

THEORETISCHE UND EXPERIMENTELLE
BESTIMMUNGEN VON ZUSATZ-
DRUCKVERLUST UND STOPFGRENZE BEI
PNEUMATISCHER STRÄHNENFÖRDERUNG

von
Karl-Ernst Wirth

Erlangen, 1980

THEORETISCHE UND EXPERIMENTELLE BESTIMMUNGEN VON ZUSATZ- DRUCKVERLUST UND STOPFGRENZE BEI PNEUMATISCHER STRÄHNENFÖRDERUNG

Der Technischen Fakultät
der Universität Erlangen - Nürnberg
zur Erlangung des Grades
Doktor - Ingenieur

vorgelegt von
Karl-Ernst Wirth

Erlangen, 1980



Als Dissertation genehmigt von
der Technischen Fakultät
der Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung: 22. Juli 1980

Tag der Promotion : 1. Dez. 1980

Dekan : Prof. Dr.-Ing. H. Niemann

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. O. Molerus

Prof. Dr.-Ing. E. Muschelknautz

Die vorliegende Arbeit ist am Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik der Universität Erlangen-Nürnberg entstanden.

Mein besonderer Dank gilt dem Lehrstuhlinhaber Herrn Professor Dr.-Ing. O. Molerus für die Anregung und für die Möglichkeit zur Durchführung der Arbeit, sowie für sein stetes Interesse an den Untersuchungen und deren tatkräftigen wissenschaftlichen Förderung.

Herrn Professor Dr.-Ing. E. Muschelknautz danke ich sehr für die Übernahme des Korreferates.

Die Herren Dipl.-Ing. D. Fritsch und Dipl.-Ing. G. Buchmann haben im Rahmen ihrer Diplomarbeiten und Herr cand. chem.-ing. T. Bogenstätter im Rahmen seiner Studienarbeit wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Für ihre sorgfältigen Arbeiten sei ihnen an dieser Stelle herzlich gedankt.

Allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Mechanische Verfahrenstechnik danke ich für die bei der Durchführung der Arbeit gewährte Unterstützung, insbesondere Frau O. M. Gleim, Frä. R. Scheffler, Herrn H. Fink, Herrn H. Drost und Herrn Ing. (grad.) H. Schoenfeldt.

Dem Leiter der Zentralwerkstatt, Herrn J. Fink und seinen Mitarbeitern danke ich für die sorgfältige Fertigung des Aufgabe- und Auffangbehälters.



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546212_0087

Inhaltsverzeichnis

=====

Seite

1.	Einleitung	1
1.1	Die pneumatische Förderung als Förderverfahren	1
1.2	Problematik und Zielsetzung	1
2.	Stand der Forschung	4
3.	Berechnung des Zusatzdruckverlust- und Zustandsdiagramms der Strähnenförderung	6
3.1	Der Zusatzdruckverlust bei der pneumatischen Förderung	6
3.2	Beschreibung des Strähnenförderungsmodells	7
3.3	Aufstellen der Kräfte- und Massenbilanzen und Berechnung der Zusatzdruckverlustgleichung bei Strähnenförderung	8
3.4	Zusatzdruckverlustgleichung für die Förderung über einer liegenden Strähne	19
3.5	Stabilitätsgrenzen des für Gleichgewichtszustände abgeleiteten Gleichungssystems der Strähnenförderung	22
3.6	Das Zustands- und Zusatzdruckverlustdiagramm der Strähnenförderung	30
3.7	Die Stopfgrenze der pneumatischen Förderung	33
4.	Versuchsanlage und Versuchsgut	39
4.1	Beschreibung der Versuchsanlage	39
4.2	Versuchsgut	41
5.	Experimentelle Ergebnisse	43
5.1	Bestimmung des Leerrohrdruckverlustes	43
5.2	Druckverlustmessungen	43
5.3	Stopfgrenze	45
6.	Vergleich zwischen gemessenen/berechneten Zusatzdruckverlusten und zwischen gemessener/berechneter Stopfgrenze	47
6.1	Bestimmung des Strähnenantriebskoeffizienten λ aus der gemessenen Stopfgrenze für Polystyrol	47
6.2	Vergleich der gemessenen und berechneten Zusatzdruckverluste der Strähnenförderung	47
6.3	Vergleich der gemessenen und berechneten Stopfgrenze der pneumatischen Förderung	51

6.4	Vergleich der berechneten Stopfgrenze mit Literaturwerten	51
6.5	Vergleich der gemessenen und berechneten Stopfgrenze für die hydraulische Förderung	55
7.	Zusammenfassung	57
8.	Verwendete Symbole	58
9.	Literaturverzeichnis	60

1. Einleitung

1.1 Die pneumatische Förderung als Förderverfahren

Als Alternative zu klassischen Förderverfahren (z. B. Becherwerk, Förderband), unter Zuhilfenahme von Luft als Fördermedium Schüttgüter in geschlossenen Rohrleitungen zu transportieren, wird seit 1887 unter der Bezeichnung "pneumatische Förderung" diese großtechnisch genutzt [1].

Zu Beginn der Verfahrensentwicklung förderte man in der Landtechnik vorwiegend Weizen [1]. Im Laufe der Zeit konnte der pneumatische Feststofftransport in zunehmendem Umfang Eingang in Mühlenbetriebe, in Kraftwerke, in die chemische Industrie und in Verladeanlagen des Straßen-, Schienen- und Schiffsverkehrs finden.

Gründe für die weite Verbreitung der pneumatischen Förderung liegen

- in der hohen Anpassungsfähigkeit der Förderstrecken an die örtlichen Gegebenheiten;
- in der umweltfreundlichen Gestaltung (staubfreie Förderung);
- in der Vielfalt an Schaltungsmöglichkeiten durch Rohrweichen;
- im geringen Wartungsaufwand für die Förderleitung;
- in der Möglichkeit, während des Fördervorganges chemische und/oder physikalische Prozesse durchzuführen;
- in der Möglichkeit, luftempfindliche Feststoffe mit Schutzgas zu fördern.

1.2 Problematik und Zielsetzung

Die horizontale pneumatische Förderung kann bei verschiedenen Förderzuständen erfolgen. In der Förderleitung stellen sich je nach Feststoffdurchsatz und Luftgeschwindigkeit unterschiedliche Förderzustände ein. Senkt man bei konstantem Feststoffmassenstrom die Luftgeschwindigkeit, so kann man in Anlehnung an Weber [2] exemplarisch die in Abb. 1 dargestellten Förderzustände beobachten.

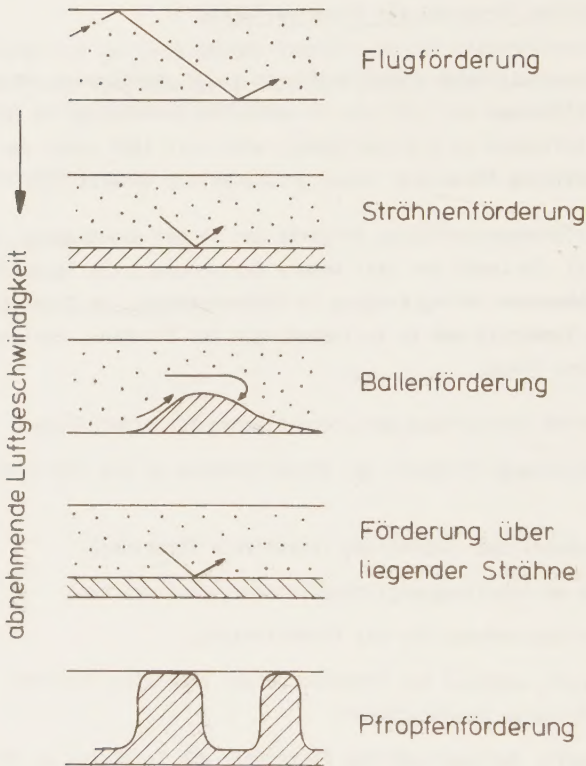


Abb. 1: Förderzustände der horizontalen pneumatischen Förderung

Bei großer Luftgeschwindigkeit bewegen sich die Feststoffteilchen homogen über den Rohrquerschnitt verteilt durch das Förderrohr. Dieser Förderzustand wird als Flugförderung bezeichnet.

Bei Verringerung der Luftgeschwindigkeit tritt eine Entmischung der Zweiphasenströmung ein, die sogenannte Strähnenförderung wird erreicht. Ein Teil des Feststoffes gleitet als Strähne am Rohrboden, während der andere Teil fliegend über der Strähne gefördert wird.

Wird die Luftgeschwindigkeit weiter abgesenkt, bilden sich streckenweise Feststoffballen am Rohrboden, und es kommt zur Ballenförderung. Die Ballen werden von aufprallenden Partikeln langsam durch die Rohrleitung transportiert.

Bei weiterer Absenkung der Luftgeschwindigkeit kommt es am Rohrboden zu Feststoffablagerungen. Der Feststofftransport erfolgt im wesentlichen fliegend über der liegenden Strähne.

Eine weitere Verkleinerung der Luftgeschwindigkeit kann schließlich zur Pfropfenförderung führen.

Ballenförderung, Förderung über einer liegenden Strähne und Pfropfenförderung werden nach Weber ^[1] als instationäre Förderzustände bezeichnet.

Um den Verschleiß der Förderleitung zu verringern und eine produktschonende Förderung zu erzielen, wird in zunehmendem Maße bei kleinen Luftgeschwindigkeiten gefördert. Außerdem arbeitet eine Förderanlage energetisch umso wirtschaftlicher, je mehr Produkt bei kleiner Luftmenge transportiert wird. Ein Förderzustand, bei dem ein Feststofftransport bei kleinen Luftgeschwindigkeiten realisiert werden kann, ist die Strähnenförderung.

Strähnenförderung wird in unmittelbarer Nähe zur instationären Ballenförderung betrieben. Da die Ballenförderung einen im Vergleich zur Strähnenförderung stark schwankenden Druckverlust zur Folge hat, ist ein sicherer Betrieb der Strähnenförderung nur bei Kenntnis der Grenze zwischen diesen beiden Förderzuständen, der sogenannten Stopfgrenze, zu erreichen. Daneben muß der durch den Feststofftransport verursachte Zusatzdruckverlust für die Dimensionierung einer pneumatischen Strähnenförderung berechenbar sein.

Ziel dieser Arbeit ist somit die Berechnung des Zusatzdruckverlustes der pneumatischen Strähnenförderung und deren experimentelle Überprüfung. Ferner soll der Bereich ermittelt werden, in dem eine stabile Strähnenförderung möglich ist.

2. Stand der Forschung

Ein Großteil der zum Gebiet "pneumatische Förderung" zählenden Facharbeiten beschäftigt sich mit der Flugförderung (u. a. [4], [5], [6]) oder mit der Pfpfen- bzw. Schubförderung (z. B. [7], [8], [9]). Muschelknautz/Krambrock haben sich in einer 1969 erschienenen Arbeit [10] eingehend mit der Berechnung der Strähnenförderung beschäftigt. Ausgehend von einer Kräftebilanz an der Strähne geben sie in ihrer Arbeit ein Zustandsdiagramm für die Strähnenförderung an. Die berechneten Druckverlustkurven stimmen jedoch bei kleinen Luftgeschwindigkeiten für kleine Feststoffmassenströme nicht mit Meßergebnissen von Welschoff [11], Weber [12] und Zens [13] überein. Während Muschelknautz/Krambrock für kleine Feststoffmassenströme ein kontinuierliches Ansteigen der Druckverlustkurven bei Verkleinerung der Luftgeschwindigkeit errechneten, hat Welschoff bei der Förderung von Weizen ein sprunghaftes Ansteigen des Druckverlustes gemessen. Ein ähnlich sprunghaftes Verhalten des Druckverlustes haben auch Zens und Weber bei Messungen mit feinkörnigen Fördergütern festgestellt.

Schon 1934 stellte Segler [5] fest, daß die Grenzkurve zwischen der Strähnenförderung und dem instationären Betrieb der Förderanlage allein durch eine Verknüpfung der Luftgeschwindigkeit mit dem Feststoffmassenstrom dargestellt werden kann. Ein Einfluß des Rohrdurchmessers auf diese Grenzkurve, die Segler Stopfgrenze genannt hat, konnte von ihm nicht beobachtet werden. Ähnliche Beobachtungen machte auch Flatow [20].

Segler [5] bestimmte als Stopfgrenze die Luftgeschwindigkeit, bei der nach dem Abschalten der Gutzufuhr eine Förderanlage wesentlich längere Zeit als bei normaler Förderung braucht, um die restlichen Partikeln durchzublasen. Ochi/Ikemori [15] hingegen bestimmten durch visuelle Betrachtung des Fördervorganges den Übergang von der gleichmäßigen Strähnenförderung zur instationären Ballenförderung als Stopfgrenze.

Barth [3] dagegen definiert als Stopfgrenze jenen Förderzustand, bei dem durch eine kleine Steigerung des zugeführten Feststoffmassenstromes oder durch eine kleine Verringerung der Luftgeschwindigkeit eine Verstopfung der Förderleitung eintritt.

Siegel [6] wiederum definierte als Stopfgrenze die Luftgeschwindigkeit beim Druckverlustminimum.

Es darf vermutet werden, daß einige Autoren wegen einer ungünstigen Streckenführung der Förderleitung (z. B. scharfe Krümmen, zu kurze Beschleunigungsstrecke) nicht die von ihnen definierte Stopfgrenze der horizontalen Förderleitung gemessen haben, sondern die Verstopfung des am ungünstigsten ausgebildeten Leitungsabschnittes.

Da keine klare und einheitliche Definition der Stopfgrenze vorhanden ist, können die Gleichungen für die Stopfgrenze der einzelnen Autoren nur schwer miteinander verglichen werden.

Barth [3] hat aufgrund einer nicht näher erläuterten Abschätzung einen Zusammenhang zwischen der Beladung und der Rohr-Froude-Zahl aufgestellt. Demnach ist die Beladung proportional der vierten Potenz der Rohr-Froude-Zahl. Muschelknautz [10] hat die von Barth für grobkörnige Partikeln angegebene Beziehung für feinkörnige Güter nicht bestätigen können. Aus praktischen Erfahrungen heraus hat er die Regel formuliert, wonach das Produkt aus Rohr-Froude-Zahl und Wurzel aus Dichteverhältnis von Luft und Feststoff einen konstanten Wert nicht unterschreiten darf. Matsumoto [14] konnte durch Messung der minimalen Transportgeschwindigkeit den Barth'schen Zusammenhang sowohl für fein-, wie auch für grobkörnige Partikeln bestätigen. Aus seinen Messungen folgt, daß die Proportionalitätskonstante von der Partikelgröße - und bei grobkörnigen Partikeln zusätzlich vom Dichteverhältnis - abhängig ist. Ochi/Ikemori [15] stellten fest, daß bei großen Beladungen die Stopfgrenze unabhängig von der Luftgeschwindigkeit ist und nur vom Reibwert zwischen Fördergut und Rohrwand abhängt.

3. Berechnung des Zusatzdruckverlust- und Zustandsdiagramms der Strähnenförderung

3.1 Der Zusatzdruckverlust bei der pneumatischen Förderung

Bei der pneumatischen Förderung geht man von der Annahme aus, daß sich der Gesamtdruckverlust ΔP additiv aus dem Druckverlust der Luftströmung ΔP_L und dem durch den Feststofftransport hervorgerufenen Zusatzdruckverlust ΔP_Z zusammensetzt (Abb. 2) [2].

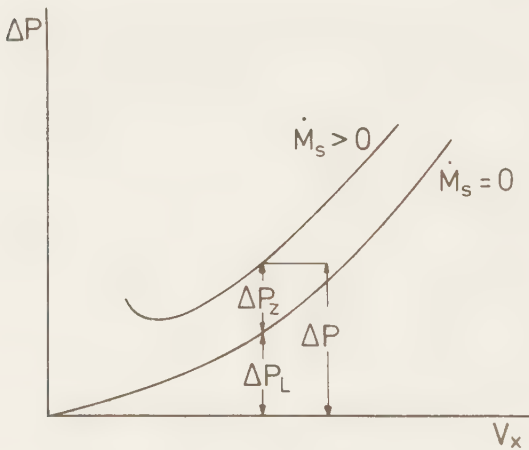


Abb. 2: Luft- und Zusatzdruckverlust bei pneumatischer Förderung

Da nach dieser Vorstellung die im Förderrohr befindlichen Feststoffpartikeln die Luftströmung nicht beeinflussen, kann der Luftdruckverlust ΔP_L mit den bekannten Formeln der Einphasenrohrströmung [22] berechnet werden:

$$\Delta P_L = \frac{1}{2} \rho_F v_x^2 \frac{\Delta L}{D} \lambda_L.$$

Um eine umfassende und nach Möglichkeit genaue Beschreibung des Zusatzdruckverlustes zu erhalten, ist nach Molerus [16] aus mindestens neun Einflußgrößen eine Verknüpfung von sechs dimensionslosen Kennzahlen zu bilden. Eine entscheidende Vereinfachung des Problems ist deshalb mit der formalen Dimensionsanalyse nicht möglich. Die Berechnung des Zusatzdruckverlustes kann also nur mit Hilfe eines Modells durchgeführt werden. In diesem Modell müssen alle für die Strähnenförderung signifikanten Kräfte berücksichtigt werden. Über Kräfte- und Massenbilanzen sollte dann die Ableitung der Zusatzdruckverlustgleichung möglich werden.

3.2 Beschreibung des Strähnenförderungsmodells

Erreicht das Verhältnis von Feststoffmassenstrom zu Luftmassenstrom, die sogenannte Beladung, bei einer festen Luftgeschwindigkeit einen bestimmten Grenzwert, so tritt bei einer Erhöhung des Feststoffmassenstroms bei sonst gleichen Bedingungen eine Entmischung der Zweiphasenströmung ein, der Zustand der Strähnenförderung wird erreicht. Ein Teil des Feststoffes $\dot{M}_{s\ St}$ wird in Form einer Strähne am Rohrboden gefördert, der andere Teil $\dot{M}_{s\ G}$ wird in Form der Flugförderung über die Strähne transportiert (Abb. 3). Der gesamte Feststoffmassenstrom $\dot{M}_s$ wird damit wie folgt errechenbar:

$$\dot{M}_s = \dot{M}_{s\ G} + \dot{M}_{s\ St} \quad (1)$$

Die am Rohrboden gleitende Strähne mit der Breite s erfüllt den Rohrquerschnitt $F = (1-\emptyset) F_o$. Die Strähne wird durch die zwischen Rohrwand und Strähne wirkende Reibkraft R gebremst. Der Antrieb der Strähne erfolgt durch die Kraft des Druckgradienten und durch die an der Strähnenoberfläche angreifende Schubkraft S (Abb. 3). Die Schubkraft S wird dabei im wesentlichen von den auf die Strähne treffenden Partikeln erzeugt [10], [17].

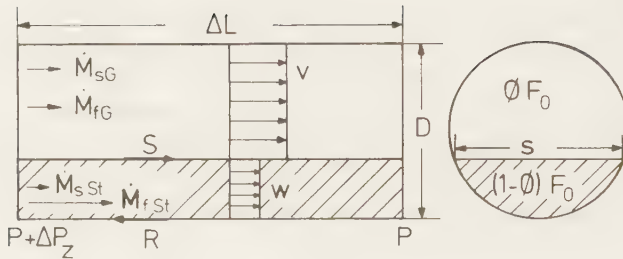


Abb. 3: Strähne in der Förderleitung

Die Porosität ϵ der Strähne soll gleich der Schüttungsporosität des Fördermaterials sein. Wie einfache Abschätzungen zeigen, kann die Relativgeschwindigkeit der sich im Strähnenhohlraum befindlichen Luft $\dot{M}_{fSt}$ gegenüber der Strähnengeschwindigkeit bei dem während der Förderung vorliegenden Druckgradienten vernachlässigt werden.

Bei den meisten in der Praxis vorkommenden Fördergütern ist deren innerer Reibungswinkel größer als der Wandreibungswinkel [18], [23]. Für das Modell kann deshalb die Strähne als kompakter Körper angesehen werden, der in Form einer Kolbenströmung mit der Geschwindigkeit w durch die Rohrleitung bewegt wird. Die Partikeln in der Strähne ändern danach während der Förderung ihre relative Lage nicht. Dies hat zur Folge, daß sie sich an der Rohrwand nur gleitend und nicht rollend bewegen. Die Luftströmung über der Strähne $\dot{M}_{fG}$ hat die Geschwindigkeit v (Abb. 3).

Für die Rechnung wird die Luft näherungsweise als abschnittsweise inkompressibel angesehen, was nach Weber [2] für Druckänderungen, bei denen die relative Dichteänderung der Luft weniger als 1 % beträgt, zulässig ist.

3.3 Aufstellen der Kräfte- und Massenbilanzen und Berechnung der ----- Zusatzdruckverlustgleichung bei Strähnenförderung -----

Für die Zusatzdruckverlustberechnung werden Kräfte- und Massenbilanzen erstellt. Dazu wird ein Rohrelement der Länge ΔL betrachtet, das in zwei Bilanzräume aufgeteilt wird. Der Bilanzraum I umfaßt die über der Strähne befindliche Strömung, in welcher der Massenstrom $\dot{M}_{sG}$ fliegend gefördert wird. Der Bilanzraum II umschließt die Strähne (Abb. 4).

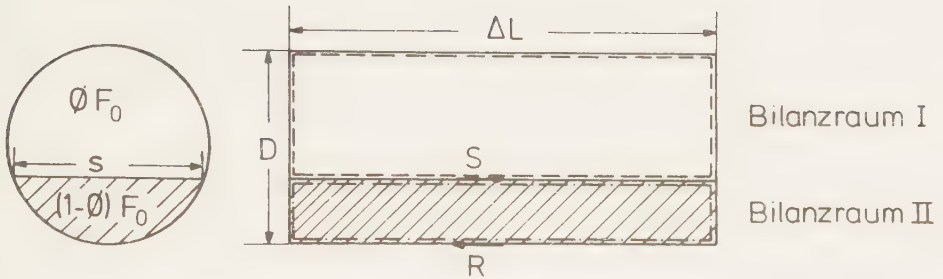


Abb. 4: Bilanzräume in einem Rohrelement der Länge ΔL

Kräftegleichgewicht am Bilanzraum I ist dann gegeben, wenn die Kraft des Zusatzdruckgradienten gleich der Strähnenantriebskraft ist

$$\Delta P_z \varnothing F_0 = S. \quad (2)$$

Der durch Partikel-Partikel- und Partikel-Wand-Stöße verursachte Zusatzdruckverlust der über die Strähne fliegenden Partikeln wird bei der Berechnung des Zusatzdruckverlustes der Strähnenförderung vernachlässigt.

Für den Bilanzraum II liegt Kräftegleichgewicht vor, wenn die Summe aus der Kraft des Zusatzdruckgradienten und der Strähnenantriebskraft gleich der Reibkraft R zwischen Strähne und Rohrwand ist:

$$\Delta P_z (1-\varnothing) F_0 + S = R. \quad (3)$$

Die Reibkraft ist gleich dem Produkt aus dem Gewicht der Strähne - vermindert um deren Auftrieb - und dem Gleitreibungsbeiwert f_r :

$$R = f_r (\rho_s - \rho_f) V_s g. \quad (4)$$

Mit dem Feststoffvolumen in der Strähne

$$V_s = (1-\epsilon) (1-\emptyset) F_0 \Delta L \quad (5)$$

erhält man durch Einsetzen von Gl. (2) und Gl. (4) in Gl. (3):

$$\Delta P_z F_0 = f_r (\rho_s - \rho_f) (1-\epsilon) (1-\emptyset) F_0 \Delta L \text{ g.} \quad (6)$$

Der dimensionslose Zusatzdruckverlust der Strähnenförderung ergibt sich damit zu

$$\frac{\Delta P_z}{\rho_s \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_s}\right) (1-\epsilon) g f_r \Delta L} = (1-\emptyset). \quad (7)$$

Die Verknüpfung von Gl. (2) und Gl. (3) über den Zusatzdruckverlust gibt den Einfluß von Schubkraft und Reibungskraft auf die relative Rohrquerschnittsbedeckung der Strähne $(1-\emptyset)$ wieder

$$S \frac{1}{\emptyset} = R. \quad (8)$$

Mit τ als der an der Strähnenoberfläche angreifenden Schubspannung folgt für die Strähnenantriebskraft

$$S = \tau s \Delta L. \quad (9)$$

Die an der Strähnenoberfläche wirkende Schubspannung τ wird durch die auf die Strähne treffenden Partikeln erzeugt [10], [17]. Die Partikeln, die homogen über den strähnenfreien Rohrquerschnitt verteilt sind, fliegen mit der Geschwindigkeit v über die Strähne. Der Schlupf zwischen der Luftströmung und den fliegenden Partikeln wird vernachlässigt. Durch den Stoß mit der Strähne wird die stoßende Partikel auf die Strähnengeschwindigkeit w abgebremst und in der Strähne weitertransportiert. Bei jedem Partikel-Strähne-Stoß wird im stationären Gleichgewichtszustand für diese Partikel eine andere Partikel mit der Geschwindigkeit w aus der Strähnenoberfläche herausgeschlagen und von der Luftströmung auf die Geschwindigkeit v beschleunigt.

Die Schubspannung τ ist somit proportional der Impulsabgabe ΔJ einer einzelnen Partikel beim Stoß auf die Strähne und dem auf die Strähnenoberfläche auftreffenden Partikelanzahlstrom pro Flächeneinheit $\dot{n}$:

$$\tau = \dot{n} \Delta J. \quad (10)$$

Die Impulsabgabe einer Partikel beim Stoß mit der Strähne ist

$$\Delta J = m (v-w). \quad (11)$$

Der Partikelanzahlstrom $\dot{n}$, der pro Flächeneinheit auf die Strähne auftrifft, ist

$$\dot{n} \sim \frac{\dot{M}_s G}{m \varnothing F_0}. \quad (12)$$

Für die Schubspannung τ ergibt sich mit den Gleichungen (10), (11) und (12):

$$\tau = K \frac{\dot{M}_s G}{m \varnothing F_0} m (v-w), \quad (13)$$

wobei K ein empirisch zu bestimmender Faktor ist.

Für die Berechnung der Strähnenantriebskraft ist, neben der Schubspannungsgleichung (13), eine Beziehung für die Strähnenbreite s als Funktion der relativen Rohrquerschnittsbedeckung der Strähne $(1-\varnothing)$ und des Rohrdurchmessers D notwendig. Für die Strähnenbreite s gilt (Abb. 5):

$$s = 2 \sqrt{h D - h^2}. \quad (14)$$

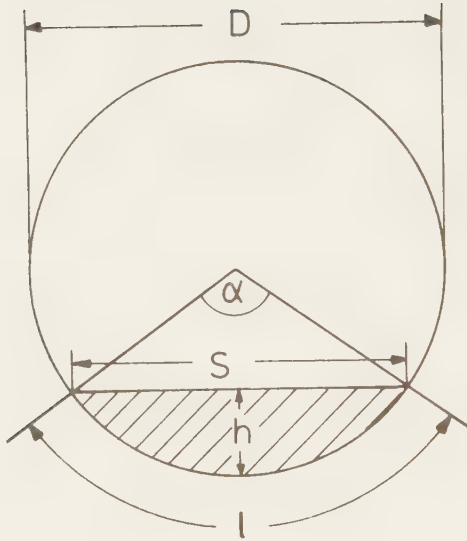


Abb. 5: Zur Geometrie der Strähne

Für die Strähnenquerschnittsfläche gilt:

$$(1-\emptyset) F_0 = \frac{1}{2} \left[1 \frac{D}{2} - s \left(\frac{D}{2} - h \right) \right], \quad (15)$$

für die Bogenlänge \$l\$:

$$l = \frac{\alpha}{360^\circ} \pi D, \quad (16)$$

und für den Winkel \$\alpha\$ (Abb. 5):

$$\alpha = \begin{cases} 2 \arcsin \frac{S}{D}, & \text{für } (1-\emptyset) \leq 0.5, \end{cases} \quad (17)$$

$$\alpha = \begin{cases} 180^\circ + 2 \arcsin \frac{S}{D}, & \text{für } (1-\emptyset) > 0.5 \end{cases} \quad (18)$$

Mit den Gleichungen (14) mit (18) kann somit die bezogene Strahlenbreite s/D als Funktion der relativen Rohrquerschnittsbedeckung $(1-\phi)$ dargestellt werden. Die strenge Lösung für diese Abhängigkeit ist rechnerisch äußerst unhandlich. Eine den wahren Zusammenhang gut wiedergebende Näherungslösung läßt sich dagegen mit folgender Gleichung finden (Abb. 6):

$$\frac{s}{D} = [4 \phi (1-\phi)]^{1/3} . \quad (19)$$

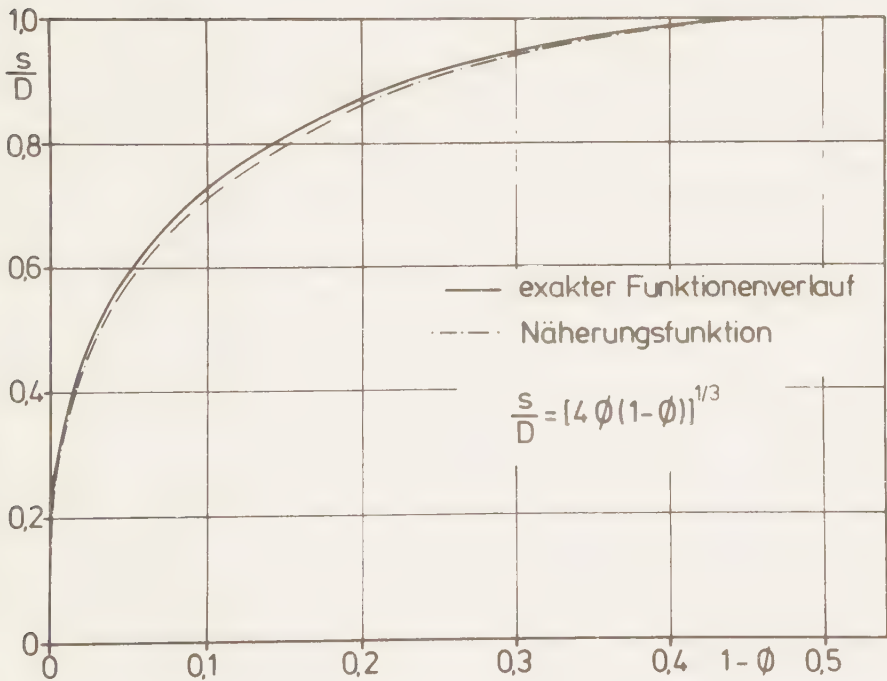


Abb. 6: Exakte Lösung und Näherungslösung für die bezogene Strahlenbreite s/D als Funktion der relativen Rohrquerschnittsbedeckung $(1-\phi)$

Mit dem Ansatz für die Schubspannung τ (13) und der Näherungslösung für die Strähnenbreite s (19) erhält man aus Gl. (9) für die Schubkraft:

$$S = K \frac{\dot{M}_s G}{m \varnothing F_0} m (v-w) \left[4 \varnothing (1-\varnothing) \right]^{1/3} D \Delta L. \quad (20)$$

Für die Ableitung der Zusatzdruckverlustgleichung bei Strähnenförderung aus den Kräftebilanzen (2) und (3) müssen neben den Gleichungen für Schubkraft (20) und Reibkraft (4) auch die Massenbilanzen berücksichtigt werden.

Der durch das Förderrohr strömende Luftmassenstrom ist

$$\dot{M}_f = \rho_f v_x F_0. \quad (21)$$

Dieser Luftmassenstrom setzt sich zusammen aus dem Anteil, der über der Strähne strömt $\dot{M}_{fG}$ und dem, der in der Strähne ohne Schlupf mittransportiert wird $\dot{M}_{fSt}$

$$\dot{M}_f = \dot{M}_{fG} + \dot{M}_{fSt}. \quad (22)$$

Da das von den über die Strähne fliegenden Partikeln eingenommene Rohrvolumen gegenüber dem von der Strähne nicht ausgefüllten Rohrvolumen klein ist, folgt aus der Luftmassenbilanz (22):

$$\rho_f F_0 v_x = \rho_f F_0 \varnothing v + \rho_f (1-\varnothing) F_0 w. \quad (23)$$

Andererseits gilt für den Feststoffmassenstrom in der Strähne:

$$\dot{M}_{sSt} = \rho_s (1-\varnothing) F_0 (1-\epsilon) w. \quad (24)$$

Aus Gl. (24) mit Gl. (23) ergibt sich der Zusammenhang zwischen der Luftgeschwindigkeit über der Strähne v und der Leerrohrgeschwindigkeit v_x :

$$v = \frac{v_x}{\varnothing} \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_s(1-\epsilon)} \mu_{St} \epsilon \right), \quad (25)$$

wobei die Beladung μ_{St} aus der Division der Feststoffbilanzgleichung (1) durch den Luftmassenstrom $\dot{M}_f$ erhalten wird

$$\mu = \mu_G + \mu_{St}. \quad (26)$$

Unter Berücksichtigung der Definition für die Beladung μ_G (26) folgt schließlich durch Einsetzen der Beziehungen (25) und (21) in Gl. (20) für die Schubkraft:

$$S = K \mu_G \rho_f v_x^2 D \Delta L \left(1 - \frac{w}{v}\right) \left[\frac{4\theta(1-\theta)}{\theta^2} \right]^{1/3} \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_s(1-\epsilon)} \mu_{St} \epsilon\right). \quad (27)$$

Faßt man das Produkt $K \mu_G$ in Gl. (27) zu einem konstanten Strähnenantriebskoeffizienten λ zusammen, der in erster Näherung für alle Fördergüter gleich sein soll, also

$$\lambda = K \mu_G,$$

so erhält man aus Gl. (8) mit Gl. (4), (5), (27) und der Gleichung für die Rohrquerschnittsfläche $F_0 = \frac{D^2 \pi}{4}$ die Schlupfgleichung der Strähnenförderung:

$$\frac{v_x^2}{\frac{\rho_s}{\rho_f} \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_s}\right) (1-\epsilon) D g f_r} = \frac{1}{\lambda} \frac{\pi}{4} \frac{\theta^3(1-\theta)}{\left[4\theta(1-\theta)\right]^{1/3}} \frac{1}{\left(1 - \frac{w}{v}\right)} \frac{1}{\left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_s(1-\epsilon)} \mu_{St} \epsilon\right)}. \quad (28)$$

Damit ist die Froude-Zahl der Strähnenförderung definiert durch

$$Fr = \frac{v_x}{\sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_f} \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_s}\right) (1-\epsilon) D g f_r}}. \quad (29)$$

Den Zusammenhang zwischen der relativen Rohrquerschnittsbedeckung der Strähne $(1-\theta)$ und dem Geschwindigkeitsverhältnis $\frac{w}{v}$ erhält man mit Hilfe der Division der Luftmassenbilanz (23) durch die Feststoffmassenbilanz der Strähne (24) unter Berücksichtigung der Definition für die Strähnenbeladung μ_{St} in (26) zu

$$(1-\theta) = \frac{1}{1 + \left[\frac{\rho_s(1-\epsilon)}{\rho_f \mu_{St}} - \epsilon \right] \frac{w}{v}}. \quad (30)$$

Das Volumenstromverhältnis $\frac{\rho_f}{\rho_s (1-\epsilon)} \mu_{St}$ ist dabei das Verhältnis des Volumenstromes der Strähne zum auf das leere Rohr bezogenen Luftvolumenstrom.

Für den Bereich der Strähnenförderung kann angenommen werden, daß der als Strähne geförderte Feststoffmassenstrom $\dot{M}_{S\ St}$ sehr viel größer ist, als der über die Strähne in Form der Flugförderung transportierte Feststoffmassenstrom $\dot{M}_{S\ G}$. Der gesamte geförderte Feststoffmassenstrom $\dot{M}_S$ ist damit praktisch gleich dem in der Strähne geförderten Feststoffmassenstrom

$$\dot{M}_S \approx \dot{M}_{S\ St}.$$

Die Strähnenbeladung μ_{St} ist deshalb praktisch gleich der gesamten Feststoffbeladung

$$\mu \approx \mu_{St}.$$

Unter Berücksichtigung dieser Vereinfachung erhält man schließlich mit den Gleichungen (7), (28) und (30) das Gleichungssystem für den Zusatzdruckverlust der Strähnenförderung:

$$\frac{\Delta P_z}{\rho_s \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_s}\right) (1-\epsilon) g f_r \Delta L} = (1-\theta), \quad (31)$$

$$\frac{v_x^2}{\frac{\rho_s}{\rho_f} \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_s}\right) (1-\epsilon) D g f_r} \equiv Fr^2 = \frac{1}{\lambda} \frac{\pi}{4} \frac{\theta^3 (1-\theta)}{\left[4\theta(1-\theta)\right]^{1/3}} \frac{1}{\left(1 - \frac{w}{V}\right)} \frac{1}{\left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_s(1-\epsilon)} \mu \epsilon\right)} \quad (32)$$

und

$$(1-\theta) = \frac{1}{1 + \left[\frac{\rho_s (1-\epsilon)}{\rho_f \mu} - \epsilon \right] \frac{w}{V}} \quad (33)$$

Wie aus dem Gleichungssystem (31) bis (33) folgt, werden für die Zusatzdruckverlustberechnung sechs dimensionslose Kennzahlen miteinander verknüpft:

$$f \left(Fr, \frac{\rho_f}{\rho_s (1-\epsilon)} \mu, \epsilon, \frac{\Delta P_z}{\rho_s \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_s}\right) (1-\epsilon) g f_r \Delta L}, (1-\emptyset), \frac{w}{v} \right) = 0.$$

Die Fr-Zahl, das Volumenstromverhältnis und die Porosität sind meist durch die Förderaufgabe vorgegeben. Der dimensionslose Zusatzdruckverlust, die relative Rohrquerschnittsbedeckung der Strähne und das Geschwindigkeitsverhältnis stellen sich dann als Systemantwort ein. Zur Bestimmung dieser drei unbekannten Kennzahlen stehen drei Gleichungen zur Verfügung.

Für die Dimensionierung einer Strähnenförderanlage ist häufig nur der Zusatzdruckverlust von Bedeutung. Es ist deshalb letztlich eine Darstellung des Zusatzdruckverlustes in der Form

$$\frac{\Delta P_z}{\rho_s \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_s}\right) (1-\epsilon) g f_r \Delta L} = f \left(Fr, \frac{\rho_f}{\rho_s (1-\epsilon)} \mu, \epsilon \right)$$

gesucht. Das Geschwindigkeitsverhältnis und die relative Rohrquerschnittsbedeckung der Strähne liefern jedoch zusätzliche Informationen über die Strähnenförderung. Damit diese Informationen nicht verlorengehen, muß bei der Berechnung des Zusatzdruckverlustdiagramms eine bestimmte formalmathematische Strategie eingehalten werden:

Aus der Massenbilanz (33) wird für konstante Volumenstromverhältnisse

$\frac{\rho_f}{\rho_s (1-\epsilon)} \mu$ bei konstanter Strähnenporosität ϵ mit dem Geschwindigkeitsverhältnis $\frac{w}{v}$ als Laufvariablen die relative Rohrquerschnittsbedeckung der Strähne $(1-\emptyset)$ berechnet. Mit den entsprechenden Werten erhält man dann aus der Druckverlustgleichung (31) den dimensionslosen Zusatzdruckverlust und aus der Schlupfgleichung (32) die Fr-Zahl. Wie später noch gezeigt wird, (Kapitel 6.1) liegt der Berechnung ein aus Versuchen ermittelter Strähnenantriebskoeffizient von $\lambda = 0.0826$ zugrunde.

In Abb. 7 sind die berechneten Zusatzdruckverlustkurven der Strähnenförderung dargestellt. Der dimensionslose Zusatzdruckverlust $\frac{\Delta P_z}{\rho_s \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_s}\right) (1-\epsilon) g f_r \Delta L}$ ist über der Fr-Zahl mit dem Volumenstromverhältnis

$\frac{\rho_f}{\rho_s(1-\varepsilon)} L$ als Parameter aufgetragen, wobei die Strähnenporosität ε konstant gehalten wurde. Für ε wurde der Wert 0.4 eingesetzt. Der Einfluß der Strähnenporosität auf den Verlauf der Zusatzdruckverlustkurven ist jedoch gering. An den zusätzlich eingezeichneten Kurven für konstante Geschwindigkeitsverhältnisse kann der sich bei der Strähnenförderung einstellende Strömungszustand abgelesen werden. Da die relative Rohrquerschnittsbedeckung der Strähne gleich dem dimensionslosen Zusatzdruckverlust ist, kann diese ebenfalls auf der Ordinate abgelesen werden.

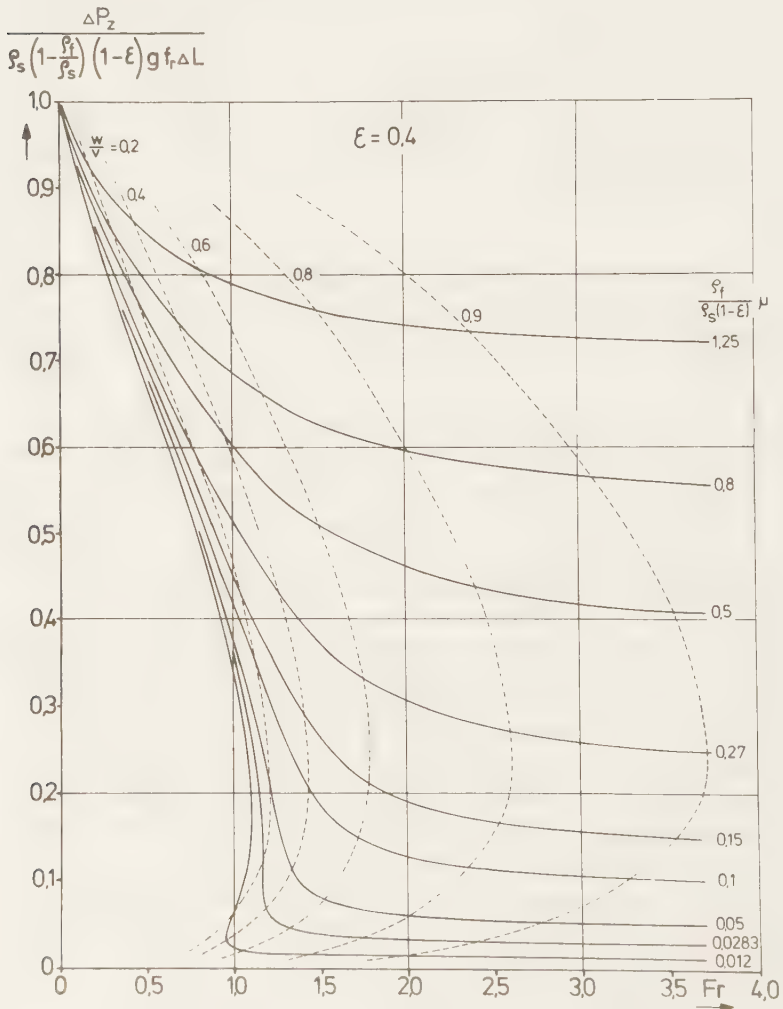


Abb. 7: Zusatzdruckverlustdiagramm der Strähnenförderung

3.4 Zusatzdruckverlustgleichung für die Förderung über einer liegenden Strähne

Die bisherigen Gleichungen wurden unter der Voraussetzung abgeleitet, daß eine Strähne am Rohrboden gleitet. Im folgenden soll der Druckverlust berechnet werden, der sich einstellt, wenn die Strähne in Ruhe bleibt und der Feststofftransport nur fliegend über der Strähne erfolgt.

Als Bedingung für Liegenbleiben der Strähne folgt aus der Gesamtbilanz für das Rohrelement der Länge ΔL durch Einsetzen von Gl. (2) in Gl. (3):

$$\Delta P_z F_0 \leq R.$$

Mit den Gleichungen (4) und (5) folgt damit für den dimensionslosen Zusatzdruckverlust die Bedingung:

$$\frac{\Delta P_z}{\rho_s \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_s}\right) (1-\epsilon) g f_r \Delta L} \leq (1-\emptyset). \quad (34)$$

Andererseits folgt aus Gl. (8), daß der Antrieb der Strähne $S \frac{1}{\emptyset}$ kleiner als die Reibkraft R sein muß

$$S \frac{1}{\emptyset} \leq R. \quad (35)$$

Da die Strähne sich nicht bewegen soll, muß für die Strähnengeschwindigkeit gelten:

$$w = 0. \quad (36)$$

Bei ruhender Strähne wird kein Feststoff in Form einer Strähne durch die Förderleitung transportiert:

$$\mu_{St} = 0. \quad (37)$$

Für die Beladung folgt damit aus Gl. (26):

$$\mu = \mu_G. \quad (38)$$

Mit den Bedingungen (36) und (37) ergibt sich aus Gl. (27) für die an der liegenden Strähne angreifenden Schubkraft:

$$S = K \mu_G \rho_f v_x^2 D \Delta L \frac{[4 \emptyset (1-\emptyset)]^{1/3}}{\emptyset^2} \quad (39)$$

Das Einsetzen der Gleichungen (4), (5) und (39) in die Ungleichung (35) liefert schließlich mit dem konstanten Strähnenantriebskoeffizienten $\lambda = K \mu_G$ die Bedingung für die Fr-Zahl, wenn die Strähne in Ruhe bleiben soll:

$$\frac{v_x^2}{(1-\epsilon) \frac{\rho_s}{\rho_f} (1 - \frac{\rho_f}{\rho_s}) D g f_r} = Fr^2 \leq \frac{1}{\lambda} \frac{\pi}{4} \frac{(1-\emptyset) \emptyset^3}{[4 \emptyset (1-\emptyset)]^{1/3}} \quad (40)$$

Mit den Beziehungen (34) und (40) wird im Druckverlustdiagramm der Bereich der liegenden Strähne vom Bereich der Strähnenförderung abgegrenzt, wobei vorausgesetzt wird, daß der Gleitreibungsbeiwert gleich dem Haftreibungsbeiwert ist. In Abb. 8 ist diese Grenzkurve als Kurve D eingezeichnet, für deren Berechnung, wie bei der Strähnenförderung, wieder $\lambda = 0.0826$ eingesetzt wurde. Im Bereich zwischen Ordinate und Kurve D liegt somit eine ruhende Strähne vor, über die fliegend Feststoff transportiert wird. Zwischen Kurve D und der Abszisse wird der Feststoff in Form der Strähnenförderung transportiert. Der Zusatzdruckverlust, der sich bei der Förderung über einer liegenden Strähne mit der Rohrquerschnittsbedeckung $(1-\emptyset)$ einstellt, folgt aus Gl. (2) durch Einsetzen von Gl. (39) bei Berücksichtigung der dimen-

sionslosen Kennzahlen Fr und $\Delta P_z / (\rho_s (1 - \frac{\rho_f}{\rho_s}) (1-\epsilon) g f_r \Delta L)$ zu

$$\frac{\Delta P_z}{\rho_s (1 - \frac{\rho_f}{\rho_s}) (1-\epsilon) g f_r \Delta L} = \lambda \frac{4}{\pi} \frac{[4 \emptyset (1-\emptyset)]^{1/3}}{\emptyset^3} Fr^2 \quad (41)$$

In Abb. 8 sind im Bereich der Förderung über einer liegenden Strähne zwischen der Ordinate und der Kurve D für verschiedene Rohrquerschnittsbedeckungen der liegenden Strähne die Zusatzdruckverlustkurven eingezeichnet. Für die Strähnenporosität wurde bei der Berechnung der Kurven wieder der Wert $\epsilon = 0.4$ und für den Strähnenantriebskoeffizienten der Wert $\lambda = 0.0826$ eingesetzt.

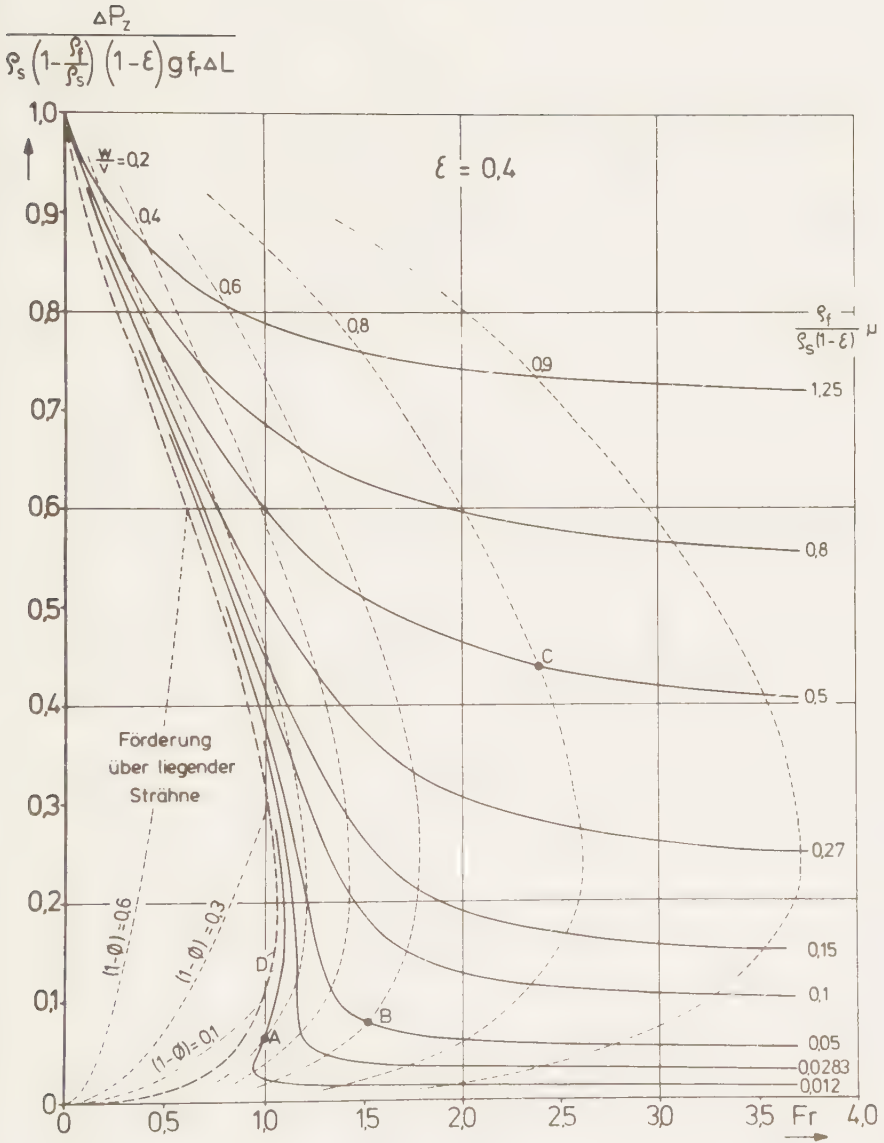


Abb. 8: Zusatzdruckverlustdiagramm für die Strähnenförderung und für Förderung über einer liegenden Strähne

3.5 Stabilitätsgrenzen des für Gleichgewichtszustände abgeleiteten Gleichungssystems der Strähnenförderung

Das Gleichungssystem (31) bis (33) für den Zusatzdruckverlust bei Strähnenförderung wurde formalmathematisch für Gleichgewichtszustände am Rohrelement abgeleitet. Inwieweit jedoch diese Gleichgewichtszustände gegenüber Störungen stabil sind, kann die mathematische Herleitung nicht liefern. Es ist deshalb eine separate Stabilitätsbetrachtung der mit dem Gleichungssystem berechneten Betriebspunkte durchzuführen, damit die Grenzen des Gültigkeitsbereichs dieses Gleichungssystems bestimmt werden können.

Die durch irgendwelche Ursachen bewirkten Betriebsstörungen haben eine Verringerung der Strähnengeschwindigkeit w und damit des Geschwindigkeitsverhältnisses $\frac{w}{v}$ zur Folge. Somit kann für jeden Betriebspunkt der Strähnenförderung dessen Stabilität anhand einer gedachten Verringerung des Geschwindigkeitsverhältnisses überprüft werden.

Bei kleineren Betriebsstörungen ist der vom Kompressor erzeugte Luftvolumenstrom und damit bei vorgegebener Förderaufgabe auch die Fr -Zahl konstant. Es wird deshalb die Auswirkung der Störung auf den durchgesetzten Feststoffmassenstrom im Vergleich zum permanent eingespeisten untersucht.

Ein mit dem Gleichungssystem (31) mit (33) berechneter Gleichgewichtszustand ist jedoch nur dann stabil, wenn bei konstanter Fr -Zahl die Betriebsstörung momentan einen größeren stationären Feststoffmassenstrom als den eingespeisten zur Folge hat.

Für die Stabilitätsdiskussion lassen sich nach Abb. 8 drei charakteristische Kategorien möglicher Betriebspunkte unterscheiden:

Kategorie 1:

Dies sind Betriebspunkte, in denen die Kurve für $\frac{\rho_f}{\rho_s (1-\epsilon)} \mu = \text{konst.}$

(Förderkennlinie) und jene für $\frac{w}{v} = \text{konst.}$ (Kennlinie des Strömungszustandes) eine positive Steigung im Druckverlustdiagramm besitzen (z. B. Punkt A in Abb. 8). Der für diese Art von Betriebspunkten charakteristische Verlauf der Förderkennlinie und der Kennlinie des Strömungszustandes ist in Abb. 9 für einen Betriebspunkt A schematisch dargestellt.

Wird durch irgendeine Störung der Strähnenförderung das Geschwindigkeitsverhältnis $(\frac{w}{v})_A$ des Betriebspunktes A bei konstanter Fr-Zahl auf $(\frac{w}{v})_{A1}$ verringert, so müßte sich der Betriebspunkt A1 einstellen. Da jedoch dieser Betriebszustand nur bei einem kleineren Volumenstromverhältnis $(\frac{\rho_f}{\rho_s(1-\epsilon)})_{A1}$ als dem eingestellten $(\frac{\rho_f}{\rho_s(1-\epsilon)})_A$ möglich wäre, würde weniger Feststoff als aufgegeben in der Förderleitung transportiert werden. Die Rohrleitung würde verstopfen. Betriebspunkte mit einem solchen Verhalten sind daher instabil. Eine Strähnenförderung ist in diesen Betriebspunkten nicht zu realisieren.

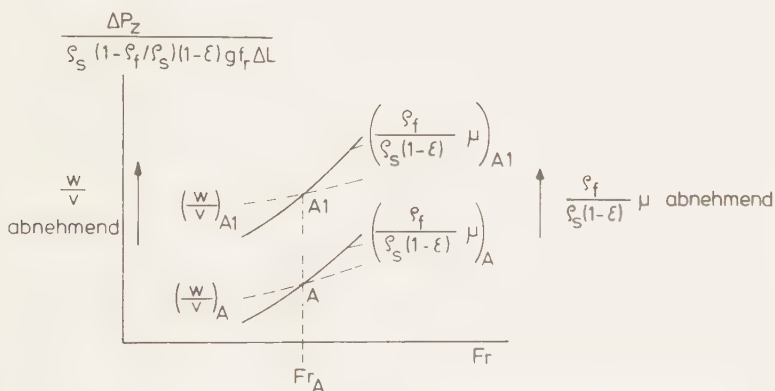


Abb. 9: Schematische Darstellung eines Betriebspunktes der Kategorie 1 im Zusatzdruckverlustdiagramm

Kategorie 2:

Dies sind Betriebspunkte, in denen die Förderkennlinie eine negative Steigung und die Kennlinie des Strömungszustandes eine positive Steigung im Zusatzdruckverlustdiagramm haben (z. B. Punkt B in Abb. 8). Als Beispiel für Betriebspunkte dieser Art sind in Abb. 10 für einen Betriebspunkt B die Kennlinien schematisch im Zusatzdruckverlustdiagramm dargestellt.

Eine Störung im Betriebspunkt B ($Fr_B = \text{konst.}$, $(\frac{\rho_f}{\rho_s(1-\epsilon)})_B = \text{konst.}$) würde mit einer Verringerung des Geschwindigkeitsverhältnisses von $(\frac{w}{v})_B$ nach $(\frac{w}{v})_{B1}$ einhergehen. Da Fr_B konstant gehalten wird, müßte sich der Betriebspunkt B1 einstellen. Der Betriebspunkt B1 ist jedoch nur dann möglich, wenn momentan ein größeres Vo-

lumenstromverhältnis $(\frac{\rho_f}{\rho_s(1-\epsilon)} \mu)_{B1}$ als im ursprünglichen Zustand gefördert würde.

Dies hätte zur Folge, daß mehr Feststoff durch die Rohrleitung transportiert würde, als aufgegeben worden ist. Es würde sich somit wieder der Betriebspunkt B einstellen. Betriebspunkte mit dieser Charakteristik sind stabil und in einer Förderanlage einstellbar.

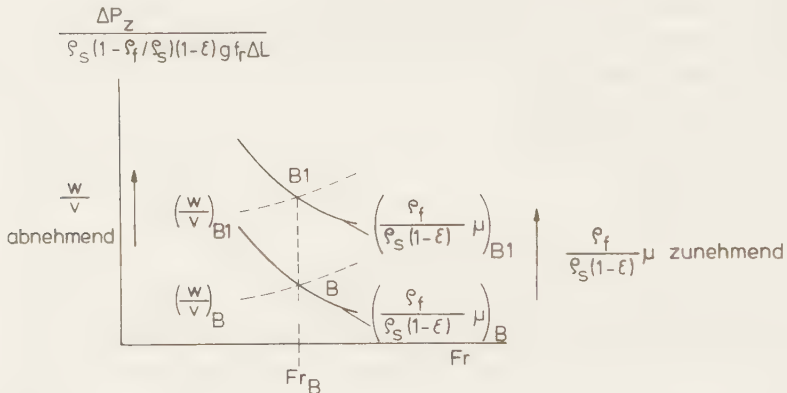


Abb. 10: Schematische Darstellung eines Betriebspunktes der Kategorie 2 im Zusatzdruckverlustdiagramm

Kategorie 3:

Dies sind Betriebspunkte, in denen die Förderkennlinie, wie die Kennlinie des Strömungszustandes eine negative Steigung im Druckverlustdiagramm haben (z. B. Punkt C in Abb. 8). Für einen Betriebspunkt C ist dies in Abb. 11 schematisch dargestellt.

Wenn die durch eine Betriebsstörung bewirkte Verkleinerung des Geschwindigkeitsverhältnisses von $(\frac{w}{v})_C$ auf $(\frac{w}{v})_{C1}$ - bei $Fr_C = \text{konst.}$ - einträte, hätte dies den Betriebspunkt C1 zur Folge. Das Volumenstromverhältnis würde somit von $(\frac{\rho_f}{\rho_s(1-\epsilon)} \mu)_C$ auf $(\frac{\rho_f}{\rho_s(1-\epsilon)} \mu)_{C1}$ abfallen. Das hätte - wie für Betriebspunkte der Kategorie 1 - zur Folge, daß momentan weniger Feststoff durch die Förderleitung transportiert würde, als permanent eingespeist wird. Die Förderung würde deshalb bei der geringsten Störung instabil. Betriebspunkte dieser Art sind für eine pneumatische Strahlenförderung also nicht einstellbar.

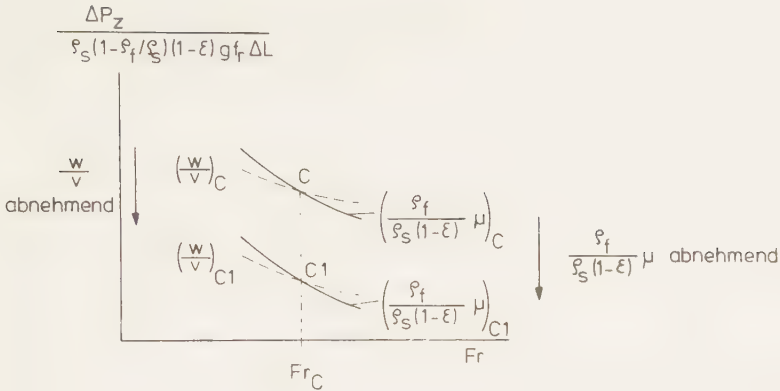


Abb. 11: Schematische Darstellung eines Betriebspunktes der Kategorie 3 im Zusatzdruckverlustdiagramm

Die Stabilitätsdiskussion für die einzelnen Kategorien von Betriebspunkten zeigt eindeutig, daß eine stabile pneumatische Strähnenförderung nur bei Betriebseinstellungen durchzuführen ist, bei denen die Förderkennlinie, d. h. die Kurve für $\frac{\rho_f}{\rho_s (1 - \epsilon)} \mu = \text{konst.}$ eine negative Steigung und die Kennlinie für den Strömungszustand, d. h. die Kurve für $\frac{w}{v} = \text{konst.}$, eine positive Steigung haben. Dies ist für Betriebspunkte der Kategorie 2 der Fall.

Im Druckverlustdiagramm kann deshalb die stabile Strähnenförderung durch zwei Grenzkurven begrenzt werden:

- a) Für die Grenzkurve 1, die die Betriebspunkte der Kategorie 1 von denen der Kategorie 2 trennt, muß gelten:

$$\left[\frac{\partial}{\partial Fr} \frac{\Delta P_z}{\rho_s \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_s}\right) (1 - \epsilon) g f_r \Delta L} \right] \stackrel{!}{=} 0 \quad (42)$$

b) Die Grenzkurve 2, die die Betriebspunkte der Kategorie 2 von denen der Kategorie 3 trennt, ist durch die Differentialgleichung

$$\left[\frac{\partial \frac{\Delta P_z}{\rho_s \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_s}\right) (1-\epsilon) g f_r \Delta L}}{\partial Fr} \right]_{\frac{w}{v}} \stackrel{!}{=} \infty \quad (43)$$

charakterisiert.

Für die Differentialgleichung (42) folgt nach der Kettenregel:

$$\left[\frac{\partial \frac{\Delta P_z}{\rho_s \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_s}\right) (1-\epsilon) g f_r \Delta L}}{\partial Fr} \right]_{\frac{\rho_f}{\rho_s(1-\epsilon)} \mu} = \left[\frac{\partial \frac{\Delta P_z}{\rho_s \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_s}\right) (1-\epsilon) g f_r \Delta L}}{\partial (1-\emptyset)} \right]_{\frac{\rho_f}{\rho_s(1-\epsilon)} \mu} \cdot \left[\frac{\partial (1-\emptyset)}{\partial \frac{w}{v}} \right]_{\frac{\rho_f}{\rho_s(1-\epsilon)} \mu} = \infty \quad (44)$$

Entsprechend erhält man für die Differentialgleichung (43):

$$\left[\frac{\partial \frac{\Delta P_z}{\rho_s \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_s}\right) (1-\epsilon) g f_r \Delta L}}{\partial Fr} \right]_{\frac{w}{v}} = \left[\frac{\partial \frac{\Delta P_z}{\rho_s \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_s}\right) (1-\epsilon) g f_r \Delta L}}{\partial (1-\emptyset)} \right]_{\frac{w}{v}} \cdot \left[\frac{\partial (1-\emptyset)}{\partial \frac{\rho_f}{\rho_s(1-\epsilon)} \mu} \right]_{\frac{w}{v}} = \infty \quad (45)$$

Wegen der Unendlichkeit der entstehenden Beziehungen wird der Rechengang hier nicht im einzelnen nachvollzogen.

Die Berechnung der beiden Grenzkurven (44) und (45) erfolgt letzten Endes mit dem Zusatzdruckverlustgleichungssystem (31) mit (33) der Strähnenförderung.

Aus Gl. (44) erhält man somit für die Grenzkurve 1 die Bedingung:

$$\frac{w}{v} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\frac{2}{5} \left[\frac{\rho_s (1-\epsilon)}{\rho_f \mu} - \epsilon \right] + 1}{\frac{\rho_s (1-\epsilon)}{\rho_f \mu} - \epsilon} \cdot \left\{ 1 \pm \sqrt{1 - \frac{32}{5} \frac{\frac{\rho_s (1-\epsilon)}{\rho_f \mu} - \epsilon}{\left\{ \frac{2}{5} \left[\frac{\rho_s (1-\epsilon)}{\rho_f \mu} - \epsilon \right] + 1 \right\}^2}} \right\} \quad (46)$$

Da der Ausdruck unter der Wurzel in Gl. (46) nicht negativ werden darf gilt für Grenzkurve 1 die Zusatzbedingung:

$$\frac{\rho_f}{\rho_s (1-\epsilon)^\mu} \leq \frac{1}{2} \frac{140 + 8 \epsilon}{4 \epsilon^2 + 25 + 140 \epsilon} \left\{ 1 \pm \sqrt{1 - 16 \frac{4 \epsilon^2 + 25 + 140 \epsilon}{(140 + 8 \epsilon)^2}} \right\} \quad (47)$$

Die Grenzkurve 1 existiert somit nur für Volumenstromverhältnisse, welche die Ungleichung (47) erfüllen.

Die Berechnung der Grenzkurve 1 erfolgt nach folgendem Schema:

Bei konstanter Strähnenporosität ϵ errechnet man aus Gl. (46) für ein die Ungleichung (47) erfüllendes Volumenstromverhältnis $\frac{\rho_f}{\rho_s (1-\epsilon)^\mu}$ das Geschwindigkeitsverhältnis $\frac{w}{v}$. Mit diesem $\frac{\rho_f}{\rho_s (1-\epsilon)^\mu}$, $\frac{w}{v}$ -Wertepaar berechnet man dann bei derselben Strähnenporosität aus den Gleichungen (31) mit (33) den dimensionslosen Zusatzdruckverlust und die Fr-Zahl. In Abb. 12 und Abb. 13 ist die Grenzkurve 1 als Kurve E eingezeichnet.

Aus Gl. (45) erhält man mit dem Zusatzdruckverlustgleichungssystem (31), (32) und (33) für die Grenzkurve 2 die Bedingung:

$$\frac{w}{v} = \frac{8 - \epsilon \frac{\rho_f}{\rho_s (1-\epsilon)^\mu}}{\left[3 \epsilon \frac{\rho_f}{\rho_s (1-\epsilon)^{\mu+2}} \right] \left[\frac{\rho_s (1-\epsilon)}{\rho_f \mu} - \epsilon \right]} \quad (48)$$

Da das Geschwindigkeitsverhältnis $\frac{w}{v}$ bei der Strähnenförderung maximal 1 werden kann, folgt aus Gl. (48) die Zusatzbedingung für die Grenzkurve 2:

$$\frac{\rho_f}{\rho_s (1-\epsilon)} \mu \leq \frac{\epsilon - 8}{6\epsilon(1-\epsilon)} \left\{ + \sqrt{1 - \frac{8(1-\epsilon)}{(\epsilon-8)^2} 3\epsilon - 1} \right\} \quad (49)$$

Bei Berücksichtigung des Gleichheitszeichens kann aus Gl. (49) für die jeweilige Strähnenporosität das maximale Volumenstromverhältnis errechnet werden, das stabil als Strähne durch die Rohrleitung gefördert werden kann. Für $\epsilon = 0.4$ ergibt sich:

$$\left(\frac{\rho_f}{\rho_s (1-\epsilon)} \mu \right)_{\max} = 0.27.$$

Die Grenzkurve 2 ist damit folgendermaßen berechenbar:

Für Volumenstromverhältnisse, die die Ungleichung (49) erfüllen, berechnet man aus Gl. (48) bei konstanter Strähnenporosität die jeweiligen Geschwindigkeitsverhältnisse. Aus den Gleichungen (31), (32) und (33) erhält man dann für die $\frac{\rho_f}{\rho_s (1-\epsilon)} \mu$, $\frac{w}{v}$ - Wertepaare den Zusammenhang zwischen dem dimensionslosen Zusatzdruckverlust und der Fr-Zahl.

Diese Grenzkurve ist in Abb. 12 und Abb. 13 als Kurve F eingezeichnet.

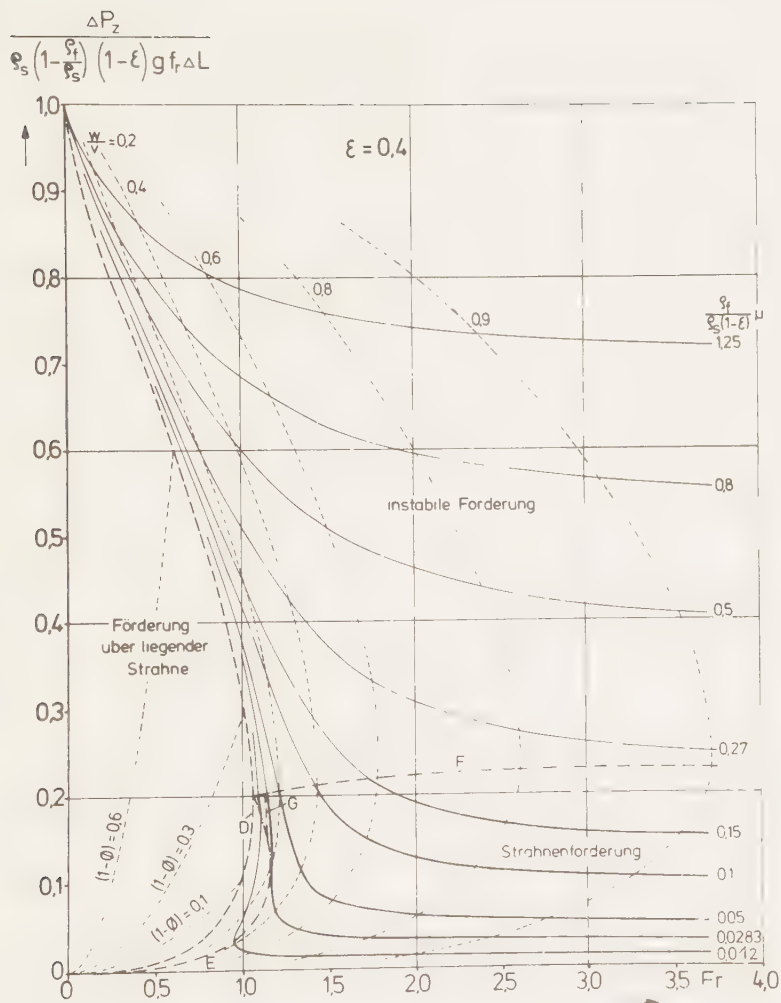


Abb. 12: Zustands- und Zusatzdruckverlustdiagramm der Strahlenförderung

3.6. Das Zustands- und Zusatzdruckverlustdiagramm der Strähnenförderung

Mit den Grenzkurven 1 (42) und 2 (43), die den Bereich der stabilen Strähnenförderung abgrenzen, der Kurve D [Ungleichungen (34) und (40)], die den Bereich der Förderung über einer liegenden Strähne begrenzt, dem Gleichungssystem für den Zusatzdruckverlust der Strähnenförderung (31), (32), (33) und der Zusatzdruckverlustgleichung für die Förderung über einer liegenden Strähne (41), ergibt sich das Zustands- und Zusatzdruckverlustdiagramm der Strähnenförderung (Abb. 12 und Abb. 13).

Verfolgt man den Kurvenverlauf für ein kleines Volumenstromverhältnis, z. B.

$$\frac{\rho_f}{\rho_s (1-\epsilon)} \mu = 0.012 \text{ (Abb. 12 und Abb. 13) von einer großen Fr-Zahl zu einer}$$

kleinen, so wird bei $Fr = 0.95$ die Kurve E erreicht. Für diese kritische Fr-Zahl sind dann zwei verschiedene Förderzustände möglich:

Förderzustand 1:

Es kann sich ein Betriebspunkt auf der Kurve E einstellen, bei dem in der Förderleitung Strähnenförderung vorliegt.

Förderzustand 2:

Es kann ein Betriebspunkt erhalten werden, der auf der Kurve D liegt, bei dem also Förderung über einer liegenden Strähne stattfindet.

Bei einer weiteren Verkleinerung der Fr-Zahl ist nur noch eine Förderung über einer liegenden Strähne möglich. Beim Übergang der Strähnenförderung zur Förderung über einer liegenden Strähne findet somit ein durch die Kurven D und E begrenzter, **plötzlicher Druckanstieg** statt.

Bis zu welcher Rohrquerschnittsbedeckung der liegenden Strähne die Förderung über einer liegenden Strähne stabil bleibt, kann aus der vorgestellten Theorie nicht abgeleitet werden. Dieses Problem ist jedoch auch nicht mehr Ziel der vorliegenden Arbeit. Es ist aber anzunehmen, daß der Betrieb einer solchen Förderung sehr empfindlich gegenüber Störungen (z. B. durch ungleichmäßige Gutaufgabe) ist. Eine pneumatische Förderung im Bereich zwischen Ordinate und Kurve D ist deshalb nur begrenzt möglich und führt leicht zur Pfropfenförderung oder zur Verstopfung der Anlage. Die maximale Fr-Zahl, bei der noch eine Förderung über einer liegenden Strähne möglich ist, erhält man aus den Beziehungen (40) und (34) zu $Fr = 1.06$. Damit ergibt sich aus Abb. 13, daß nur für Volumenstromverhältnisse $\frac{\rho_f}{\rho_s (1-\epsilon)} \mu \lesssim 0.019$ ein Übergang

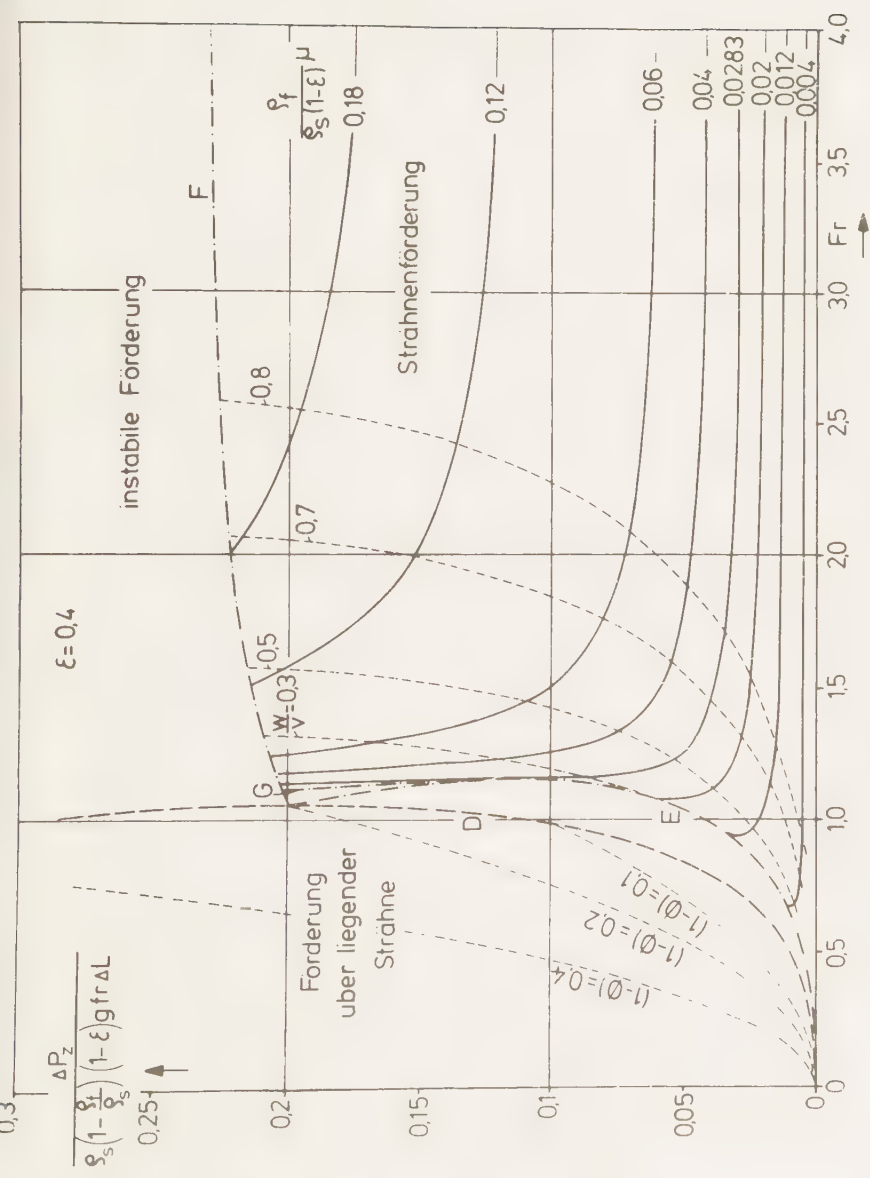


Abb. 13: Zustands- und Zusatzdruckverlustdiagramm der stabilen Strahlenförderung

von der stabilen Strähnenförderung zur Förderung über einer liegenden Strähne möglich wird.

Bei Verkleinerung der Fr-Zahl, bei konstantem Volumenstromverhältnis, unter die von der Kurve E vorgegebene kritische Fr-Zahl, wird für Volumenstromverhältnisse

$$0.019 < \frac{\rho_f}{\rho_s (1 - \epsilon)} \mu \leq 0.025$$

die Strähnenförderung instabil.

Für Volumenstromverhältnisse $0.025 < \frac{\rho_f}{\rho_s (1 - \epsilon)} \mu < 0.0283$ sind bei der durch die Kurve E festgelegten kritischen Fr-Zahl wieder zwei stabile Förderzustände möglich. Einerseits kann eine stabile Strähnenförderung bei kleiner Rohrquerschnittsbedeckung der Strähne und einem Zusatzdruckverlust, der durch die Kurve E bestimmt ist, erfolgen. Andererseits ist eine stabile Strähnenförderung bei einer größeren Rohrquerschnittsbedeckung der Strähne und einem Zusatzdruckverlust entsprechend der Kurve G möglich (Abb. 12 und Abb. 13).

Der durch die Kurven E, F und G begrenzte Förderbereich (Abb. 13 und Abb. 12) wird nur mit einer bestimmten Anfahrweise erreicht. Ein Betriebspunkt in diesem Förderbereich ist nicht durch Verringern der Fr-Zahl bei gleichzeitigem Konstanthalten des Volumenstromverhältnisses anzufahren. Die einzige Möglichkeit, einen solchen Betriebspunkt zu erreichen, besteht darin, daß von einem großen Volumenstromverhältnis und einer großen Fr-Zahl ausgehend bei konstantem Zusatzdruckverlust Fr-Zahl und Volumenstromverhältnis simultan verringert werden. Diese Betriebspunkte sind energetisch jedoch äußerst ungünstig und für die Praxis somit uninteressant. Hinzu kommt, daß eine kleine Änderung der Fr-Zahl diese Betriebspunkte bereits instabil werden läßt.

Wird für eine pneumatische Strähnenförderung ein Betriebspunkt bei einem großen Volumenstromverhältnis, z. B. $\frac{\rho_f}{\rho_s (1 - \epsilon)} \mu = 0.18$, und einer großen Fr-Zahl, z. B. $Fr = 3.0$, gewählt, so erkennt man, daß beim Verringern der Fr-Zahl bei gleichzeitigem Konstanthalten des Volumenstromverhältnisses der Betriebspunkt auf der Kurve $\frac{\rho_f}{\rho_s (1 - \epsilon)} \mu = 0.18$ nach links verschoben wird (Abb. 13). Bei $Fr = 2.0$ wird bei diesem Volumenstromverhältnis die Grenzkurve F erreicht und die stabile Strähnenförderung wird bei weiterer Ver-

ringierung der Fr-Zahl instabil. Im Bereich der instabilen Förderung ist jedoch durchaus noch eine Förderung mit einem instationären Förderzustand (z. B. Pfropfenförderung) möglich.

Damit folgt, daß für Volumenstromverhältnisse

$$\frac{\rho_f}{\rho_s (1 - \epsilon)} \mu > 0.019$$

die stabile Strähnenförderung instabil wird.

Das Geschwindigkeitsverhältnis $\frac{w}{v}$ in der Nähe der Grenzkurve E bewegt sich zwischen $\frac{w}{v} = 0.4$ und $\frac{w}{v} = 0.3$.

Eine stabile Strähnenförderung ist nur bis zu einer relativen Rohrquerschnittsbedeckung der Strähne von maximal 20 % möglich. Dies ist, wie aus der Berechnung der Grenzkurve für die liegende Strähne folgt, auf das Zusammenwirken der Schubspannung τ , der Strähnenbreite s und der relativen Rohrquerschnittsbedeckung der Strähne $(1-\emptyset)$ zurückzuführen.

Danach wird bei konstanter Fr-Zahl und kleinen Werten von $(1-\emptyset)$ mit zunehmender Rohrquerschnittsbedeckung der Strähne der Strähnenantrieb von der Vergrößerung der Strähnenbreite s bestimmt. Bei größeren $(1-\emptyset)$ -Werten wird dagegen der Antrieb von der Geschwindigkeitserhöhung aufgrund der Zunahme der Rohrquerschnittsbedeckung der Strähne bestimmt. Bei einer Rohrquerschnittsbedeckung von 20 % ist das Zusammenwirken von Schubspannung und Strähnenbreite am ungünstigsten.

3.7 Die Stopfgrenze der pneumatischen Förderung

Anhand von Abb. 13 kann die Stopfgrenze der pneumatischen Förderung definiert werden: als Stopfgrenze werden alle Betriebspunkte bezeichnet, bei denen die Strähnenförderung bei einer Verkleinerung der Fr-Zahl bei konstantem Volumenstromverhältnis instabil wird oder in die Förderung über einer liegenden Strähne übergeht. Dies ist für all jene Betriebspunkte, die für Volumenstromverhältnisse

$$0 \leq \frac{\rho_f}{\rho_s (1 - \epsilon)} \mu \leq 0.025$$

auf der Kurve E und für Volumenstromverhältnisse

$$\frac{\rho_f}{\rho_s (1-\epsilon)} \mu > 0.025$$

auf der Kurve F liegen, der Fall. Trägt man für diese Punkte das Volumenstromverhältnis über der Fr-Zahl auf, so erhält man das Diagramm für die Stopfgrenze der pneumatischen Förderung (Abb. 14). Neben der Stopfgrenze für eine locker geschüttete Strähne ($\epsilon=0.8$) ist in Abb. 14 die Stopfgrenze für eine hohlraumfreie Strähne ($\epsilon=0$), in der keine Luft mittransportiert wird, eingezeichnet. Die beiden Kurvenverläufe unterscheiden sich trotz des großen Porositätsunterschieds nur unwesentlich.

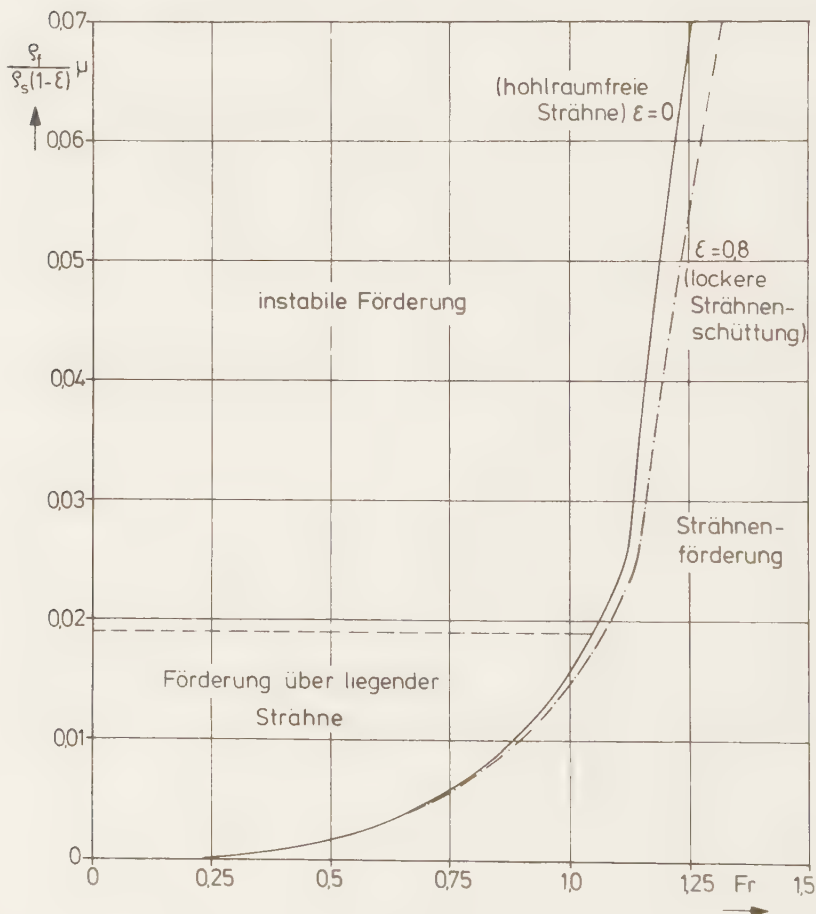


Abb. 14: Stopfgrenze der pneumatischen Förderung

Die stabilen Betriebspunkte der pneumatischen Strähnenförderung liegen im Bereich zwischen Stopfgrenze und Abszisse.

In einer Förderanlage, deren Betriebspunkt im Bereich zwischen Ordinate und der Stopfgrenze liegt, findet für Volumenstromverhältnisse

$$\frac{\rho_f}{\rho_s(1-\epsilon)} \mu \leq 0.019$$

eine Förderung über liegender Strähne, für Volumenstromverhältnisse

$$\frac{\rho_f}{\rho_s(1-\epsilon)} \mu > 0.019$$

eine instabile Förderung statt.

Im Bereich der instabilen Förderung ist jedoch noch durchaus eine pneumatische Förderung bei einem instationären Förderzustand möglich.

Eine Abhängigkeit der aus dem Zusatzdruckverlustgleichungssystem (31) mit (33) abgeleiteten Stopfgrenze von der Partikelgröße oder der Partikelsinkgeschwindigkeit ist, wie beim Zusatzdruckverlust der Strähnenförderung, nicht gegeben.

Aus der doppeltlogarithmischen Auftragung der Stopfgrenze (Abb. 15) erhält man eine gute Näherungsgleichung für die Stopfgrenze:

$$\frac{\rho_f}{\rho_s(1-\epsilon)} \mu = 0.018 Fr^4.$$

Für große Fr-Zahlen strebt die Stopfgrenze zum maximalen als Strähne transportierbaren Volumenstromverhältnis. Dieses maximale Volumenstromverhältnis ist nach Gl. (48) für $\epsilon = 0.4$:

$$\left(\frac{\rho_f}{\rho_s(1-\epsilon)} \mu \right)_{\max} = 0.27.$$

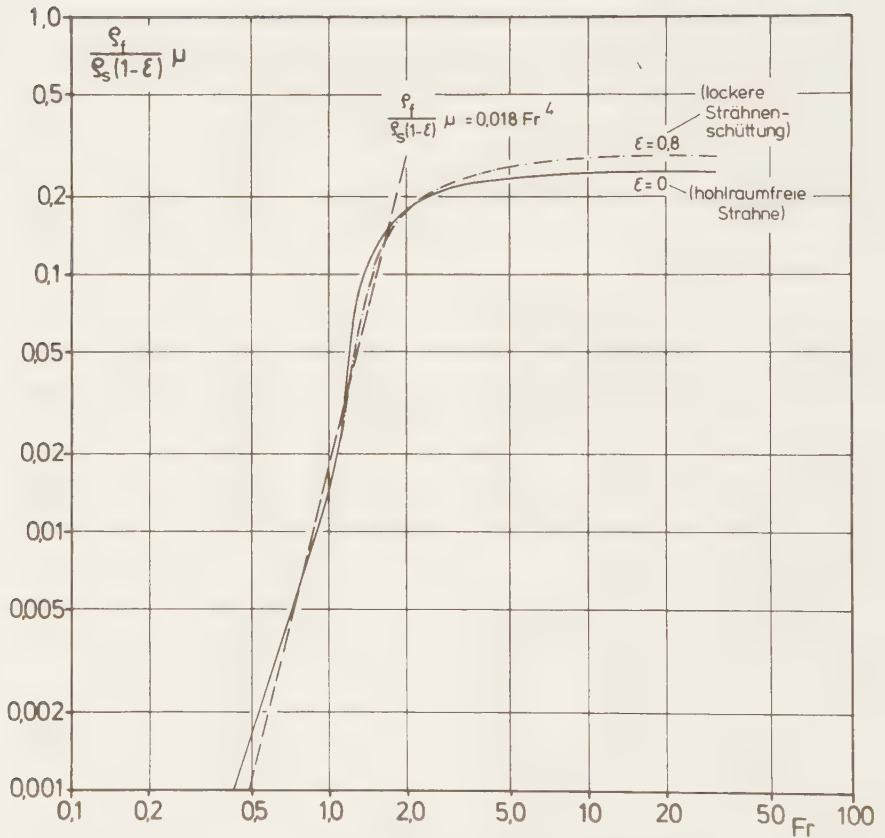


Abb.: 15: Doppeltlogarithmische Auftragung der Stopfgrenze bei pneumatischer Förderung

Die Grenzkurven, aus denen sich die Stopfgrenze ableitet, wurden durch Stabilitätsbetrachtungen bei kleinen Betriebsstörungen gewonnen. Größere Störungen können auftreten, wenn der Haftreibungsbeiwert merklich größer als der Gleitreibungsbeiwert ist, und sich dadurch Feststoff am Rohrboden absetzen kann. Dieses Absetzen kann nur im Bereich der Strähnenförderung

für Volumenstromverhältnisse

$$\frac{\rho_f}{\rho_s (1-\epsilon)} \mu \leq 0.019$$

stattfinden, da für diese Volumenstromverhältnisse die Strähnenförderung in die Förderung über einer liegenden Strähne übergeht. Lagert sich nun in diesem Bereich der Strähnenförderung zufällig Feststoff ab, so ist, bei sonst gleichen Bedingungen, in die Fr-Zahl der größere Haftreibungsbeiwert einzusetzen. Liegt der neue Betriebspunkt links von der für kleine Betriebsstörungen abgeleiteten Stopfgrenze (Abb. 13), so bleibt eine Strähne am Rohrboden liegen.

Ist z. B. der Haftreibungsbeiwert doppelt so groß wie der Gleitreibungsbeiwert, so wird die für kleine Betriebsstörungen abgeleitete Stopfgrenze für Volumenstromverhältnisse

$$\frac{\rho_f}{\rho_s (1-\epsilon)} \mu \leq 0.019$$

zu um 40 % größere Fr-Zahlen verschoben (Abb. 16).

Dies hat zur Folge, daß bei unterschiedlichen Haft- und Gleitreibungsbeiwerten für Volumenstromverhältnisse

$$\frac{\rho_f}{\rho_s (1-\epsilon)} \mu \leq 0.019$$

immer der Einfluß der Haftreibung auf die Stopfgrenze zu berücksichtigen ist.

Bei konstanter Strähnenporosität bestimmen allein das Volumenstromverhältnis und die Fr-Zahl die Stopfgrenze. Damit kann der für das Stopfen kritische Punkt in der Förderleitung aufgespürt werden.

In einer Förderleitung wird bei konstanter Betriebseinstellung generell ein konstanter Luft- und Feststoffmassenstrom transportiert. Damit ergibt sich bei konstantem Rohrdurchmesser aus dem Volumenstromverhältnis:

$$\frac{\rho_f}{\rho_s (1-\epsilon)} \mu = K_1 \rho_f$$

und aus der Froude-Zahl

$$Fr = K_2 \frac{1}{\rho_f}$$

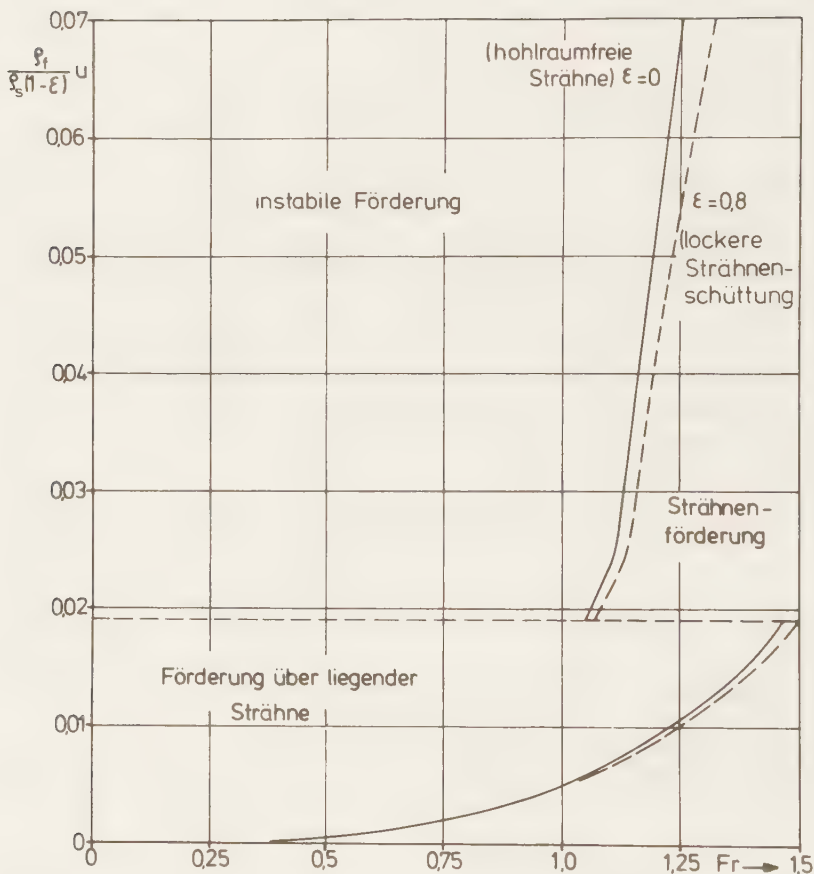


Abb. 16: Stopfgrenze der pneumatischen Förderung
(unter Berücksichtigung des Haftreibungseinflusses)

Die die Stopfgrenze bestimmenden Größen sind somit nur von der Luftdichte abhängig. In einer Förderanlage ist unmittelbar nach der Guteinspeisung der größte Absolutdruck und damit die größte Luftdichte vorhanden. An dieser Stelle liegen somit bei einer horizontalen Förderstrecke das größte Volumenstromverhältnis und die kleinste Fr -Zahl vor. Unmittelbar nach der Guteinspeisung wird deshalb jede pneumatische Förderung **z u e r s t** instabil werden. An dieser Stelle muß somit bezüglich der Stopfgrenze eine horizontale Förderstrecke ausgelegt werden. Da die Messungen für die Bestimmung der Stopfgrenze immer erst einige Meter nach der Guteinspeisung vorgenommen werden, kann die Stopfgrenze experimentell nicht genau bestimmt werden.

Die hier theoretisch abgeleiteten Aussagen werden nachstehend anhand von gezielten Experimenten überprüft.

4. Versuchsanlage und Versuchsgut

4.1 Beschreibung der Versuchsanlage

Die Förderluft wird von einem Schrauben-Kompressor geliefert und durch die Ventile 1 und 2 dem Kältetrockner mit 9 bar zugeführt (Abb. 17). Im Kältetrockner wird die Luft auf $+2^{\circ}\text{C}$ abgekühlt und ist dadurch für die Versuche nahezu wasserfrei. Ferner kann mit den Ventilen 1 und 2 der Förderluftvolumenstrom eingestellt werden, der mit einer Blende gemessen wird. Nach dem Passieren der Blende wird die Luft in den Aufgabebehälter geleitet. Im unteren Teil des Aufgabebehälters ist zur Feststoffdosierung eine Schüttelrinne eingebaut. Über eine Druckausgleichsleitung ist der gesamte Aufgabebehälter auf demselben Druckniveau. Dadurch ist bei allen Versuchen eine genaue und konstante Feststoffdosierung mit Hilfe der Schüttelrinne gewährleistet.

Um eine gute Feststoffbeschleunigung zu erzielen, verließen nun bei der Versuchsdurchführung Feststoff und Förderluft den Aufgabebehälter über einen Krümmer mit kleinerem Rohrdurchmesser als dem der Förderstrecke. Nach einer Anlaufänge von ca. 9 m folgte die 2.8 m lange Meßstrecke mit $D = 0.04$ bzw. $D = 0.01$ m. Damit die Strähnenförderung visuell beobachtet werden konnte, wurden alle Messungen in einer Glasrohrförderstrecke durchgeführt. Über eine Rückführleitung wurde die feststoffbeladene Strömung einem auf dem Auffangbehälter angebrachten Zyklon zur Feststoffabscheidung zugeführt. Zur Feinreinigung konnte schließlich die Förderluft in einen Schlauchfilter geleitet werden. Über ein Hebelsystem war zur Bestimmung des Feststoffmassenstromes der Auffangbehälter einseitig auf einer Waage gelagert. Die im Schlauchfilter angefallene Feststoffmenge war gewichtsmäßig so gering, daß sie bei der Bestimmung des Feststoffmassenstromes nicht berücksichtigt werden brauchte. Nach dem Füllen des Auffangbehälters wurde der Feststoff wieder in das Aufgabegefäß zurückgepumpt.

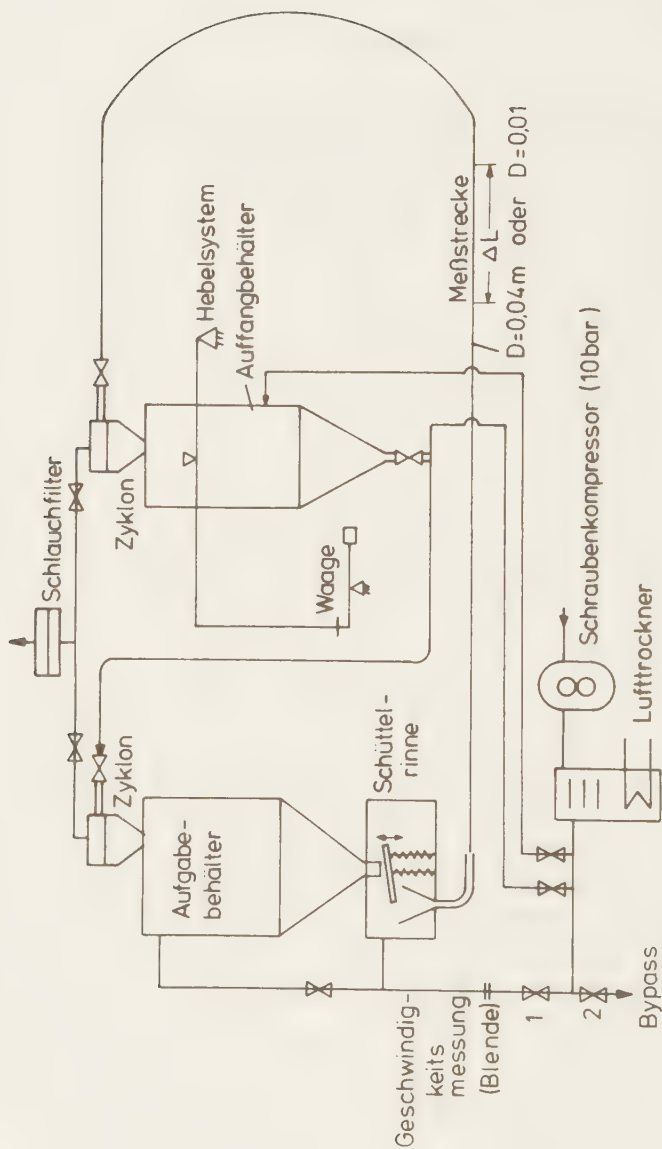


Abb. 17: Versuchsanlage

4.2. Versuchsgut

Insgesamt wurden Messungen mit 8 verschiedenen Versuchsgütern durchgeführt: 5 Quarzsande, ein Polystyrol, eine Glaskugelfraktion und Weizen. Die Materialdaten der einzelnen Versuchsgüter sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Materialdaten	Glas- kugeln	Quarzsand					Poly- styrol	Weizen
		Sand 1	Sand 2	Sand 3	Sand 4	Sand 5		
d_p [μm]	90	108	316	710	1020	2300	2300	3300
ρ_s [kg/m^3]	2840	2620	2584	2616	2628	2611	1050	1281
ϵ [-]	0.42	0.44	0.45	0.425	0.45	0.44	0.4	0.36
f_r [-]	0.230	0.400	0.407	0.436	0.412	0.567	0.503	0.300

Tabelle 1: Materialdaten der verwendeten Versuchsgüter

Der Korndurchmesser d_p wurde aus der Siebanalyse bei 50 % Durchgang bestimmt. Die Feststoffdichte wurde mit dem Pyknometer gemessen und die Porosität bei lockerer Schüttung bestimmt. Für die Bestimmung des Gleitreibungskoeffizienten wurde am Ende jeder Druckverlustmeßreihe die Meßstrecke ausgebaut. Auf ein 0.1 m langes Messingrohr wurden Feststoffpartikeln geklebt und dieses Rohrstück in das Glasrohr gelegt. Es wurde dann der Neigungswinkel des Glasrohres bestimmt, bei dem das einmal angestoßene, beklebte Messingrohr gerade nicht mehr zur Ruhe kam (Abb. 18). Aus dem Neigungswinkel wurde dann der Gleitreibungskoeffizient berechnet.

Der Haftreibungskoeffizient wurde hingegen aus dem Neigungswinkel des Glasrohres berechnet, bei dem sich das im Glasrohr liegende, beklebte Messingrohr gerade in Bewegung setzt.

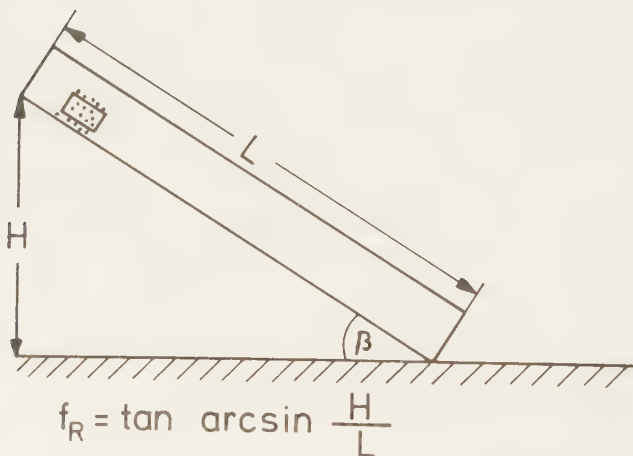


Abb. 18: Bestimmung des Gleitreibungswinkels

5. Experimentelle Ergebnisse

5.1 Bestimmung des Leerrohrdruckverlustes

In Anlehnung an Flatow [19] wurde der Leerrohrdruckverlust $\Delta P_L / \Delta L$ über der bezogenen Luftgeschwindigkeit $v_o = v_x \sqrt{\frac{\rho_f}{\rho_o}}$ aufgetragen und mit einer quadratischen Regression korreliert. Mit dieser Regression konnte aus dem gemessenen Gesamtdruckverlust ΔP der Zusatzdruckverlust der Strähnenförderung ΔP_z berechnet werden. Der Vorteil dieser Vorgehensweise für die Auswertung liegt darin, daß für Luftdichteunterschiede von $\pm 20 \%$, bezogen auf eine mittlere Dichte, nur eine Leerrohrdruckverlustkurve im ΔP - v_o -Diagramm existiert, während im ΔP - v_x -Diagramm eine Kurvenschar mit der Luftdichte als Parameter vorliegt.

5.2 Druckverlustmessungen

Druckverlustmessungen wurden für die Quarzsande 1, 2, 4 und 5, Polystyrol und Weizen in der Glasförderleitung mit $D = 0.04 \text{ mm}$ durchgeführt. Die Druckverluste für Polystyrol wurden bei verschiedenen Luftdichten gemessen. Für alle untersuchten Fördergüter haben die Druckverluste ähnliche Verläufe (Abb. 19, Abb. 20).

Liegen große Luftgeschwindigkeiten vor, so ergibt sich Flugförderung, der Druckverlust steigt bei konstantem Feststoffmassenstrom mit zunehmender Luftgeschwindigkeit an (a) (Abb. 19). Bei kleineren Luftgeschwindigkeiten tritt eine Entmischung der feststoffbeladenen Strömung ein, der Zustand der Strähnenförderung ist erreicht (b). Mit abnehmender Luftgeschwindigkeit steigt für diesen Förderzustand bei konstantem Feststoffmassenstrom der Druckverlust an. Flugförderung und Strähnenförderung sind nicht scharf gegeneinander abgegrenzt, der Übergang ist fließend. Bei noch kleineren Luftgeschwindigkeiten bleibt bei kleinen Feststoffmassenströmen die Strähne am Rohrboden liegen und der Druckverlust steigt schlagartig an (c). Bei diesem Förderzustand wird der Feststoff im wesentlichen im ablagerungsfreien Rohrquerschnitt in Form der Flugförderung transportiert. Ein geringer Feststoffanteil rollt auf der Strähne durch das Förderrohr. Zwischen Strähnenförderung und der Förderung über einer liegenden Strähne befindet sich ein kleiner Geschwindigkeitsbereich, in dem Ballen durch die Rohrleitung wandern. Diesem Förderzustand

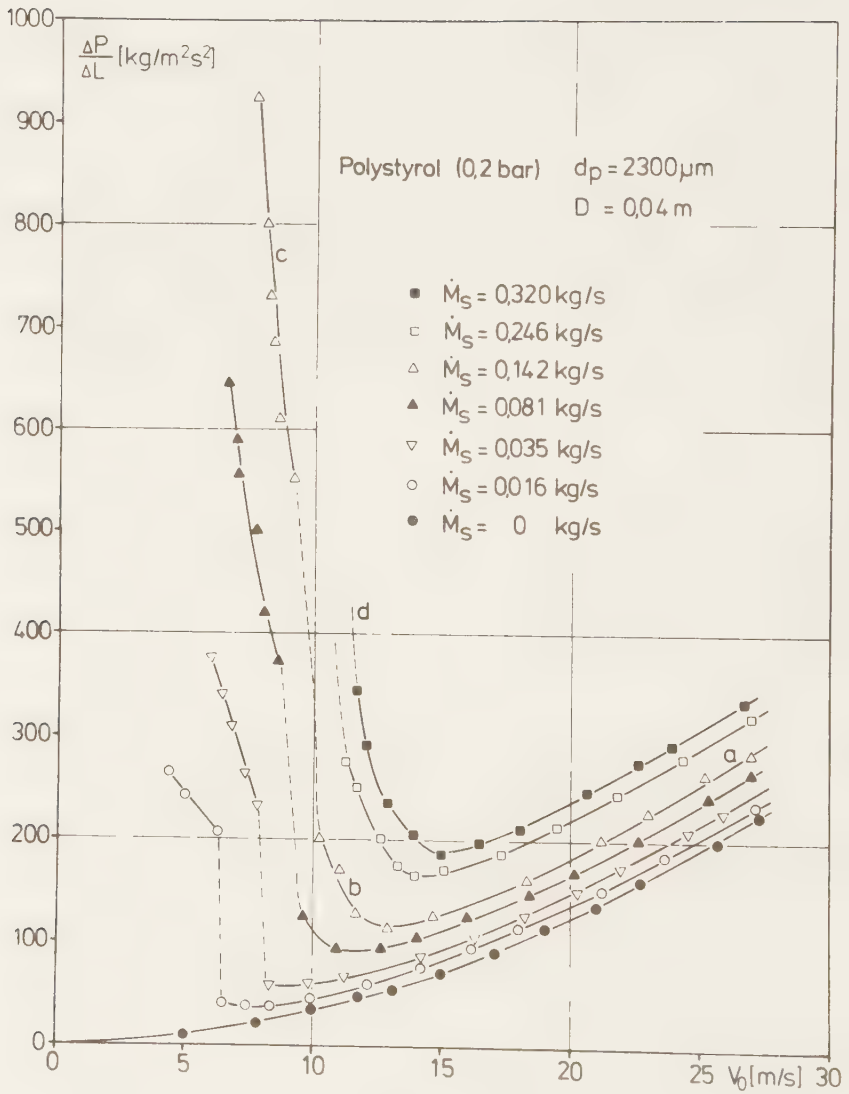


Abb. 19: Druckverlust für Polystyrol bei 0.2 bar Überdruck in einer Glasrohrleitung mit $D = 0,04 \text{ m}$

kann kein stationärer Druckverlust zugeordnet werden. Der Druckverlust ist deshalb in diesem Geschwindigkeitsbereich gestrichelt eingezeichnet. Bei großen Feststoffmassenströmen lagerte sich kein Feststoff am Rohrboden ab. Hier war ein direkter Übergang der Strähnenförderung über die Ballenförderung zur Verstopfung der Anlage bei feinkörnigem Quarzsand $d_p = 108 \mu\text{m}$ und zur Pfropfenförderung bei grobkörnigen Feststoffen gegeben.

5.3 Stopfgrenze

Die Stopfgrenze wird in der Literatur unterschiedlich definiert. In der vorliegenden Arbeit konnte aufgrund von Druckverlustaufzeichnungen mit einem Schreiber die Stopfgrenze bestimmt werden. Sie wurde als Grenze zwischen dem zeitlich konstanten Druckverlustverlauf der Strähnenförderung und dem zeitlich stark schwankenden Druckverlustverlauf der Ballenförderung definiert (Abb. 20). Aufgrund dieser Definition konnte die Stopfgrenze bei wiederholten Versuchen reproduzierbar gemessen werden. Die visuelle Bestimmung der Stopfgrenze über das Auftreten von Ballen war hingegen mit größeren Fehlern behaftet.

Die in den Versuchen ermittelte Stopfgrenze ist für den störungsfreien Betrieb einer pneumatischen Förderanlage von entscheidender Bedeutung. Bei kleineren als durch die Stopfgrenze vorgegebenen Luftgeschwindigkeiten schwankt der Druckverlust der Anlage stark und je nach Größe verstopft die Förderanlage. Steht eine genügend große Druckreserve zur Verfügung, kann allerdings auch bei diesen Geschwindigkeiten noch gefördert werden, da fast jede verstopfte Förderleitung bei entsprechendem Druckgradienten freigeblasen werden kann.

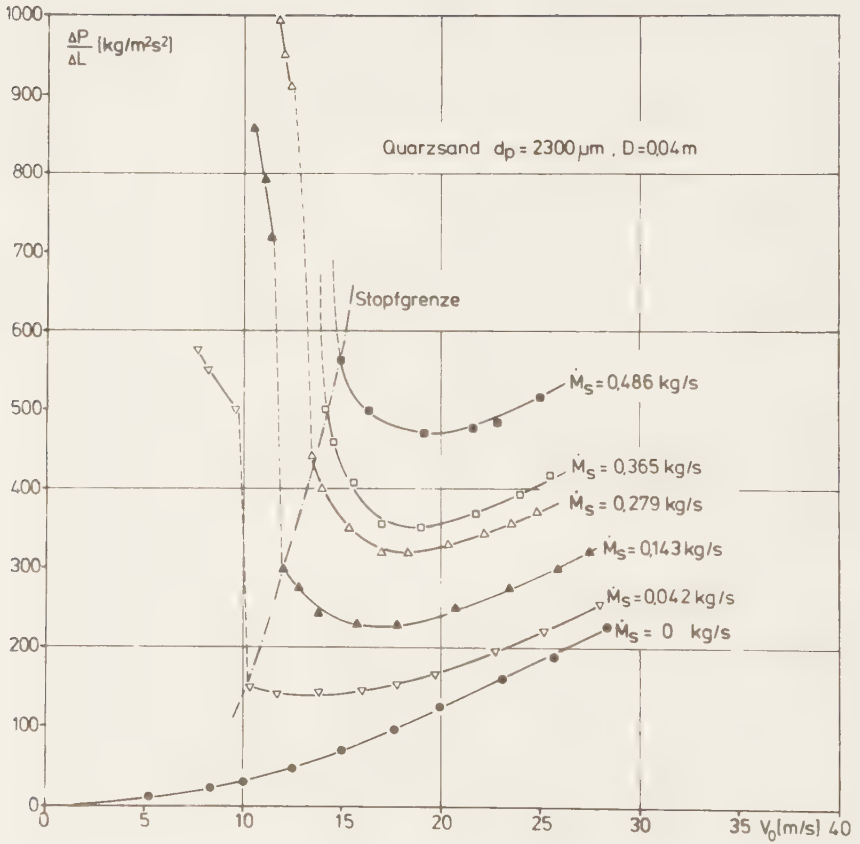


Abb. 20: Gemessene Stopfgrenze für Quarzsand $d_p = 2300 \mu\text{m}$ in einer Glasrohrleitung mit $D = 0,04 \text{ m}$

6. Vergleich zwischen gemessenen/berechneten Zusatzdruckverlusten und zwischen gemessener/berechneter Stopfgrenze

6.1 Bestimmung des Strähnenantriebskoeffizienten λ aus der gemessenen Stopfgrenze für Polystyrol

Um das Zustands- und Zusatzdruckverlustdiagramm der Strähnenförderung berechnen zu können, benötigt man den Strähnenantriebskoeffizienten λ , der, wie aus Kapitel 3.3 ersichtlich, nur experimentell bestimmt werden kann.

Die Definition der theoretischen und experimentell bestimmten Stopfgrenze ist gleich, somit kann durch deren Vergleich der Strähnenantriebskoeffizient ermittelt werden. Da er für alle Feststoffe gleich sein soll, kann er aus der Stopfgrenze eines Versuchsgutes bestimmt werden. Die größte Variation des Volumenstromverhältnisses wurde für Polystyrol bei 0.2 bar Überdruck in der Förderleitung durchgeführt, und die Stopfgrenze dieses Fördergutes deshalb für die λ -Bestimmung herangezogen. In Abb. 21 ist, da Haft- und Gleitreibungsbeiwert für Polystyrol gleich groß sind, die für kleine Betriebsstörungen abgeleitete theoretische Stopfgrenze als dicke Kurve für $\epsilon = 0.4$ eingezeichnet.

Die gemessene Stopfgrenze wird durch die berechnete optimal wiedergegeben, wenn $\lambda = 0.0826$ gesetzt wird. Dieser Strähnenantriebskoeffizient wird bei allen Berechnungen verwendet.

6.2 Vergleich der gemessenen und berechneten Zusatzdruckverluste der Strähnenförderung

Die gemessenen Zusatzdruckverluste werden im folgenden mit den theoretischen, mit den Gleichungen (31), (32) und (33) berechneten Zusatzdruckverlusten verglichen. Für den Vergleich wird dabei nur jener Teil der gemessenen Zusatzdruckverlustkurven herangezogen, bei dem Strähnen- und Flugförderung vorlag. Da an der Förderanlage lediglich der Feststoffmassenstrom bei Variation der Förderluftgeschwindigkeit konstant gehalten wurde, nicht jedoch das Volumenstromverhältnis, werden die gemessenen und berechneten Zusatzdruckverluste bei konstanten Feststoffmassenströmen verglichen.

Der Haftreibungsbeiwert bei Weizen ist um 70 % größer als der Gleitreibungsbeiwert. Der Einfluß der Haftreibung auf die Stopfgrenze muß deshalb für Volumenstromverhältnisse

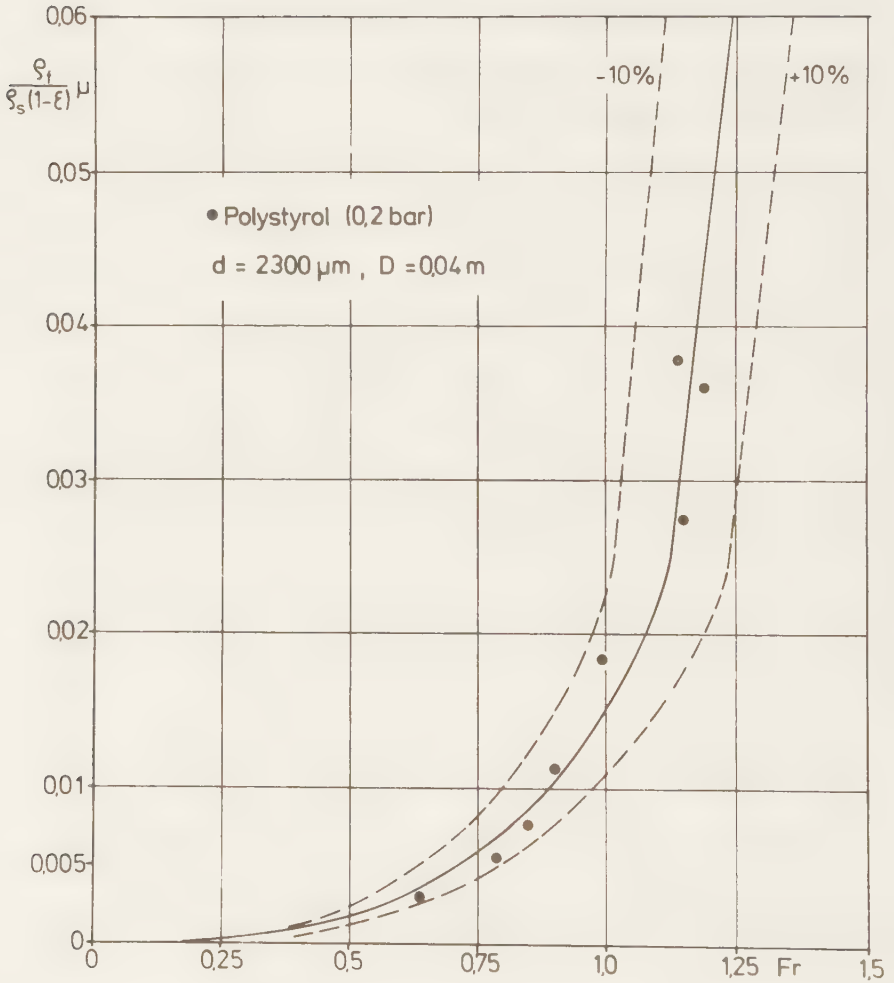


Abb. 21: Bestimmung des Strähnenantriebskoeffizienten aus dem Vergleich der gemessenen und berechneten Stopfgrenze für Polystyrol bei 0.2 bar Überdruck in der Glasrohrleitung

$$\frac{\rho_f}{\rho_s(1-\epsilon)} \mu \leq 0.019$$

berücksichtigt werden (siehe Kapitel 3.7). Dadurch verschiebt sich für diese Volumenstromverhältnisse die für kleine Betriebsstörungen abgeleitete Stopfgrenze zu um 30 % größeren Fr-Zahlen. In Abb. 22 begrenzt die gestrichelte Kurve das Gebiet der stabilen Strähnenförderung.

Die gemessenen Zusatzdruckverluste für Weizen stimmen vor allem in unmittelbarer Nähe der Stopfgrenze gut mit den berechneten überein. Bei größeren Fr-Zahlen liegen die gemessenen Zusatzdruckverluste im Vergleich zu den dick eingezeichneten, berechneten Zusatzdruckverlusten bei zu großen Werten. Dies ist auf den Einfluß der Partikel-Partikel- und Partikel-Wand-Stöße der über die Strähne fliegenden Partikeln zurückzuführen. Er wird bei der Berechnung des Zusatzdruckverlustes der Strähnenförderung außer acht gelassen.

Die gemessenen und berechneten Zusatzdruckverluste für Polystyrol bei 1 bar Überdruck in der Förderleitung stimmen gut überein (Abb. 22). Da für Polystyrol Haft- und Gleitreibungsbeiwert gleich groß sind, ist die für kleine Betriebsstörungen abgeleitete Stopfgrenze gestrichelt in das Zusatzdruckverlustdiagramm eingezeichnet.

Für Volumenstromverhältnisse

$$\frac{\rho_f}{\rho_s(1-\epsilon)} \mu \leq 0.019$$

konnte generell für alle untersuchten Fördergüter ein sprunghaftes Ansteigen des Zusatzdruckverlustes beim Übergang von der stabilen Strähnenförderung zur Förderung über einer liegenden Strähne gemessen werden. Diese Meßergebnisse stehen im Einklang mit den theoretischen Betrachtungen in Kapitel 3.6.

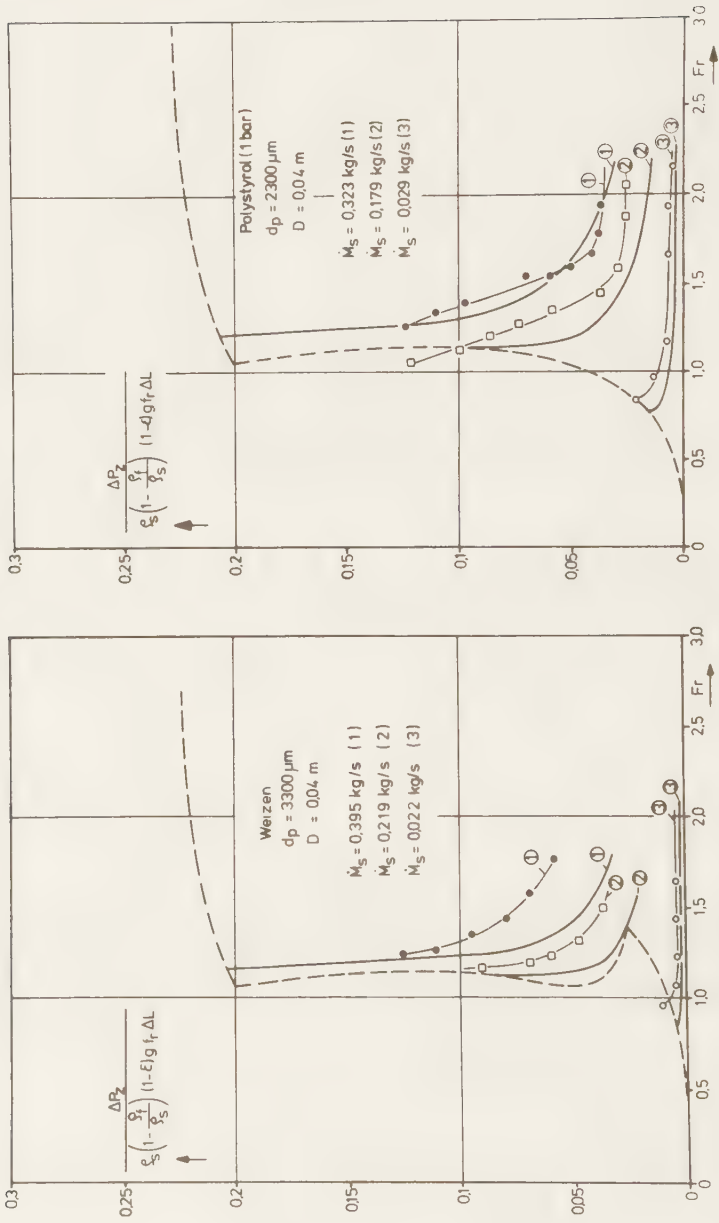


Abb. 22: Gemessener und berechneter Zusatzdruckverlust für Weizen und Polystyrol im Glasrohr mit $D = 0.04$ (Bei Polystyrol 1 bar Überdruck in der Förderleitung)

6.3 Vergleich der gemessenen und berechneten Stopfgrenze der -----pneumatischen Förderung-----

In Kapitel 3.7 wurde gezeigt, daß der Einfluß der Porosität auf den Verlauf der Stopfgrenze gering ist. Die Stopfgrenze wird deshalb mit einer mittleren Porosität von $\epsilon = 0.4$ berechnet.

Beim Weizen ist der Haftreibungsbeiwert größer als der Gleitreibungsbeiwert. Deshalb muß für dieses Versuchsgut der Einfluß der Haftreibung auf die Stopfgrenze berücksichtigt werden. Da der Haftreibungsbeiwert für Weizen um 70 % größer als der Gleitreibungsbeiwert ist, wird die für kleine Betriebsstörungen abgeleitete Stopfgrenze für Volumenstromverhältnisse

$$\frac{\rho_f}{\rho_s (1-\epsilon)} \mu \leq 0.019$$

zu um 30 % größeren Fr-Zahlen verschoben. In Abb. 23 ist diese theoretisch bestimmte Stopfgrenze als dicke Kurve eingezeichnet.

Bei allen anderen Versuchsgütern waren der Haft- und Gleitreibungsbeiwert gleich groß. In Abb. 24 sind für diese Fördergüter - mit Ausnahme der Messungen für Polystyrol bei 0.2 bar Überdruck in der Förderleitung, aus denen der λ -Wert bestimmt wurde - deshalb die gemessenen Stopfgrenzpunkte mit der für kleine Betriebsstörungen abgeleiteten dick eingezeichneten Stopfgrenze verglichen. Da die Bestimmung der Gleitreibungsbeiwerte mit einem Fehler von ± 10 % behaftet ist, kann von einer guten Übereinstimmung zwischen der gemessenen Stopfgrenze, bei der der Partikeldurchmesser um den Faktor 36, die Feststoffdichte um den Faktor 2.6, die Fluiddichte um den Faktor 1.67 und der Rohrdurchmesser um den Faktor 4 geändert wurden, und der berechneten Stopfgrenze gesprochen werden.

6.4 Vergleich der berechneten Stopfgrenze mit Literaturwerten

Die in der Literatur wiedergegebenen Stopfgrenzen sind häufig ungenau definiert. Zudem fehlt vielfach eine Angabe über den Gleitreibungsbeiwert. Es können deshalb nur die Messungen von Ochi/Ikemori [15] und Welschhof [11] mit der berechneten Stopfgrenze verglichen werden. Während sich die Stopfgrenzdefinition dieser Arbeit mit der von Ochi/Ikemori verwendeten deckt, kann aus den Druckverlustmessungen von Welschhof an Weizen die Stopfgrenze entnommen werden.

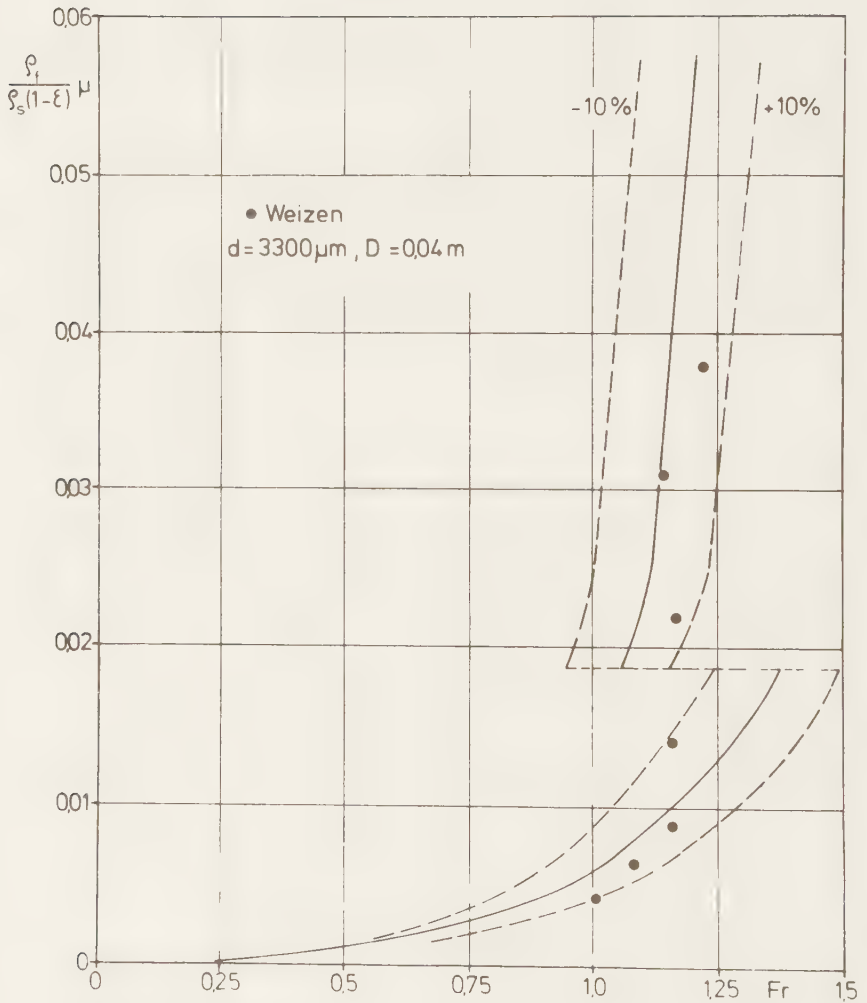


Abb. 23: Gemessene Stopfgrenze für Weizen im Vergleich zur berechneten, bei Berücksichtigung des Haftreibungseinflusses

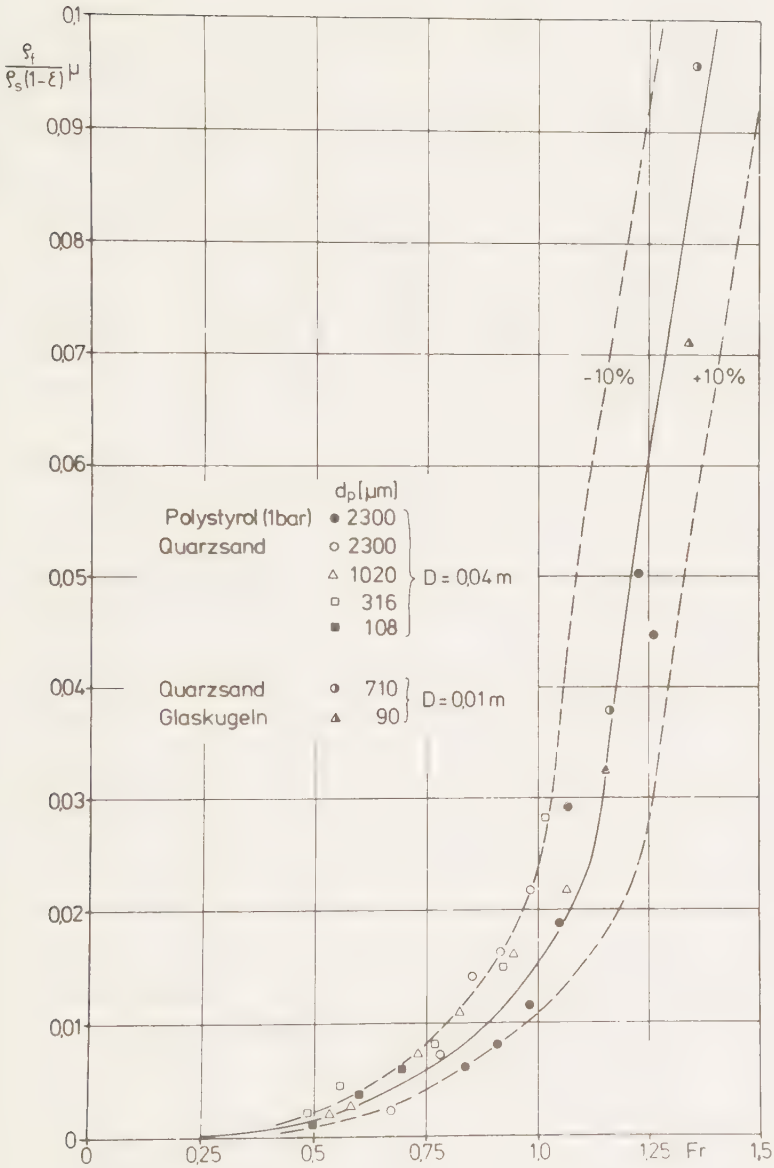


Abb. 24: Gemessene Stopfgrenze im Vergleich zur berechneten
(Bei Polystyrol 1 bar Überdruck in der Förderleitung)

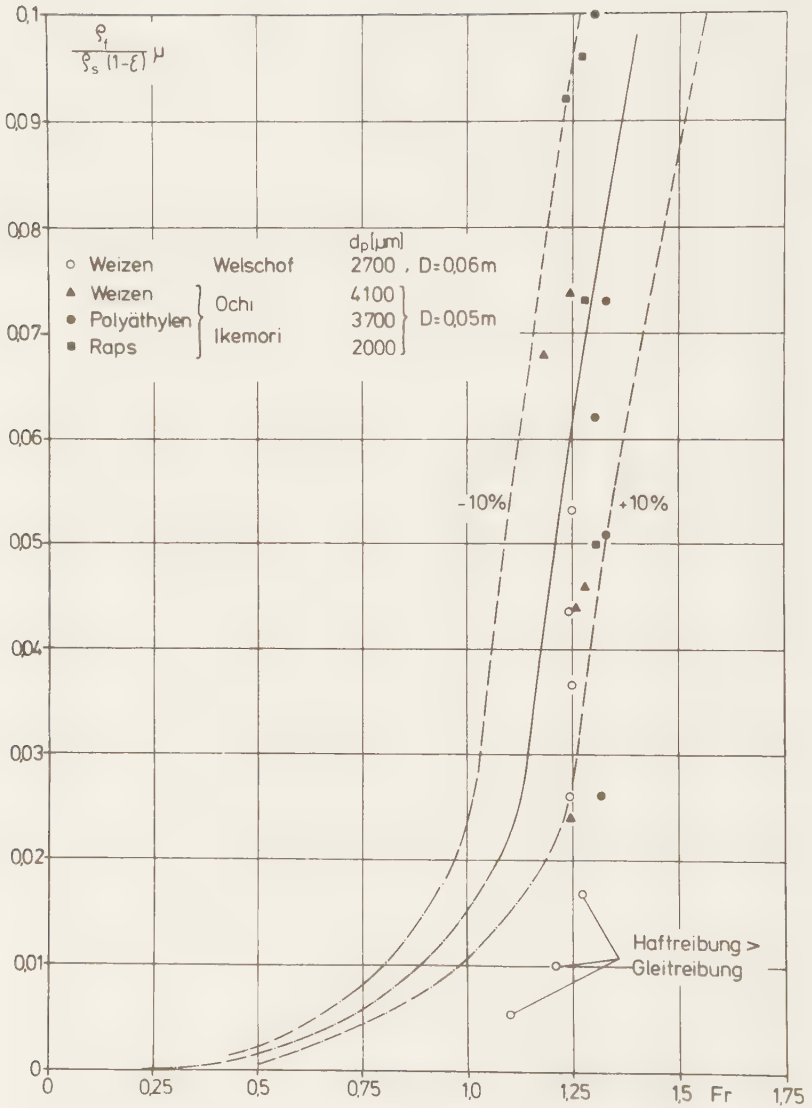


Abb. 25: Vergleich: berechnete Stopfgrenze - Literaturwerte

Die Messungen von Ochi/Ikemori an einer Förderleitung mit $D = 0.05 \text{ m}$ und jene von Welschof an einer Förderleitung mit $D = 0.06 \text{ m}$ werden, wie Abb. 25 zeigt, von der für kleine Betriebsstörungen theoretisch abgeleiteten und mit $\epsilon = 0.4$ berechneten dick eingezeichneten Stopfgrenze gut wiedergegeben.

Da keine Angaben über Haftreibungsbeiwerte vorliegen, kann in Abb. 25 der Einfluß der Haftreibung auf die berechnete Stopfgrenze für Volumenstromverhältnisse $\frac{\rho_f}{\rho_s (1-\epsilon)} \mu \leq 0.019$ quantitativ nicht berücksichtigt werden.

Ein direkter Vergleich der gemessenen Stopfgrenzpunkte mit der berechneten Stopfgrenze ist deshalb für Volumenstromverhältnisse $\frac{\rho_f}{\rho_s (1-\epsilon)} \mu \leq 0.019$ nicht möglich.

6.5 Vergleich der gemessenen und berechneten Stopfgrenze für die -----hydraulische Förderung-----

Neben den Stopfversuchen bei der pneumatischen Förderung wurden in einer hydraulischen Förderanlage [21] mit einem Förderrohrdurchmesser von $D = 0.05 \text{ m}$ Stopfversuche mit Quarzsand $d_p = 2.3 \text{ mm}$ durchgeführt. Da grober Quarzsand verwendet wurde, ist auch hier die Modellvoraussetzung erfüllt, daß der Feststoffmassenstrom über der gleitenden Strähne im Vergleich zum Feststoffmassenstrom in der Strähne vernachlässigt werden kann.

Der Gleitreibungsbeiwert wurde wie bei der pneumatischen Förderung bestimmt, wobei das mit Quarzsand beklebte Messingrohr auf einem dünnen Wasserfilm glitt. Es ergab sich ein Gleitreibungsbeiwert von $f_r = 0.65$. Der Haftreibungsbeiwert war nur geringfügig größer.

Die Stopfgrenze wurde visuell über das Auftreten von Ablagerungen und Ballen bestimmt. Trotz dieser ungenauen Stopfgrenzbestimmung kann von einer guten Übereinstimmung zwischen der gemessenen und der mit $\epsilon = 0.4$ berechneten Stopfgrenze gesprochen werden (Abb. 26).

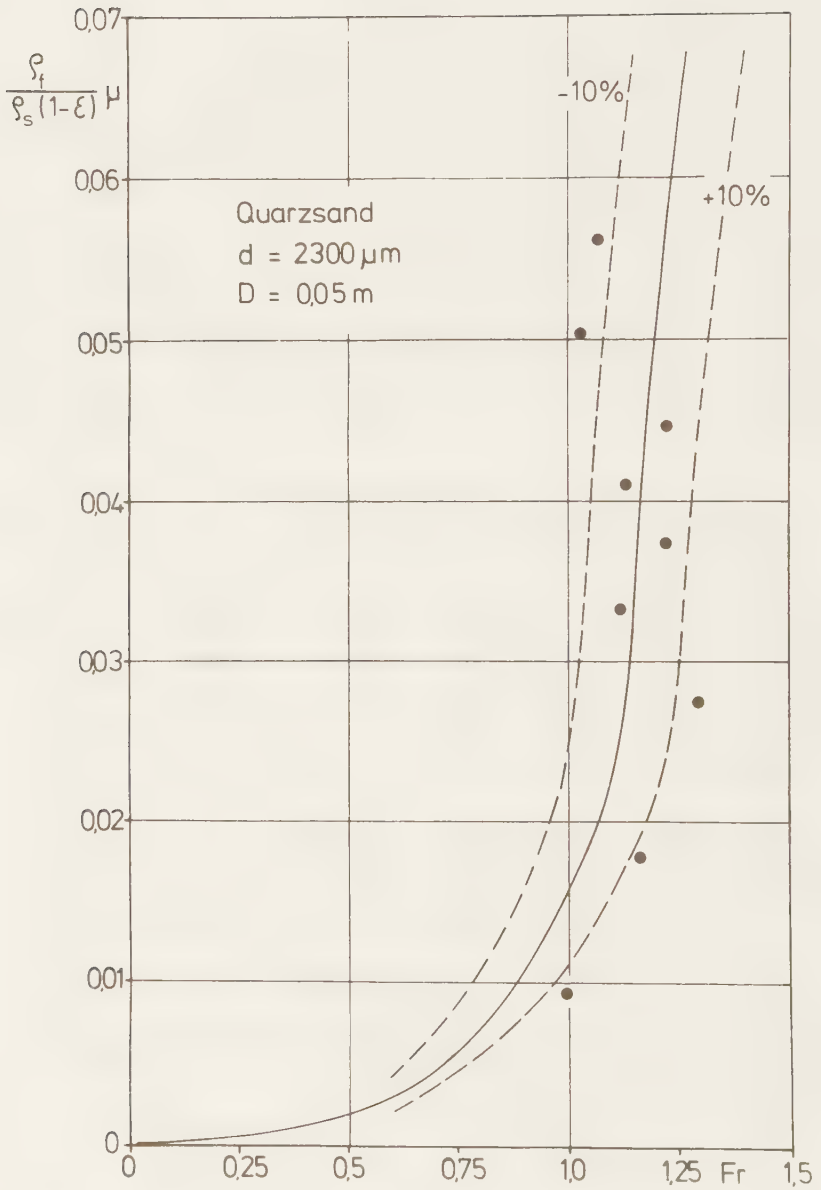


Abb. 26: Vergleich zwischen berechneter und gemessener Stopfgrenze bei der hydraulischen Förderung von Quarzsand $d_p = 2300 \mu\text{m}$

7. Zusammenfassung

Aus Kräfte- und Massenbilanzen an der Strähne wurde ein Gleichungssystem erhalten, mit dessen Hilfe der Zusatzdruckverlust bei pneumatischer Strähnenförderung berechnet werden kann. Die mit den aus dem Gleichungssystem neu abgeleiteten dimensionslosen Kennzahlen dargestellten Meßwerte des Zusatzdruckverlustes stimmen vor allem in unmittelbarer Nähe der Stopfgrenze gut mit den berechneten Werten überein. Ferner konnte theoretisch wie experimentell nachgewiesen werden, daß bei kleineren Feststoffmassenströmen ein Zusatzdruckverlustsprung beim Übergang von der Strähnenförderung zur Förderung über einer liegenden Strähne existiert.

Mit Hilfe von Stabilitätsbetrachtungen wurde für die Strähnenförderung ein Zustandsdiagramm entwickelt. Der Bereich der stabilen Strähnenförderung konnte gegen den Bereich der Förderung über einer liegenden Strähne und gegen den Bereich der instabilen Förderung abgegrenzt werden.

Die aus Stabilitätsbetrachtungen abgeleitete Stopfgrenze gibt den Übergang zwischen der stabilen Strähnenförderung und der instabilen Förderung, bzw. der Förderung über einer liegenden Strähne wieder. Mit Hilfe der Aufzeichnung des zeitlichen Differenzdruckverlaufes konnte die Stopfgrenze experimentell reproduzierbar gemessen werden. Aus einem Vergleich der gemessenen und berechneten Stopfgrenze für Polystyrol konnte der Strähnenantriebskoeffizient bestimmt werden. Die gemessenen Stopfgrenzen, bei denen die Fluidichte um den Faktor 1000, die Feststoffdichte um den Faktor 2,6, der Rohrdurchmesser um den Faktor 5 und der Partikeldurchmesser um den Faktor 36 geändert wurden, werden durch die berechnete Stopfgrenze gut wiedergegeben. Die berücksichtigten Literaturwerte bestätigen weitgehend die eigenen Messungen. Unterscheiden sich Gleit- und Haftreibungsbeiwert um mehr als 10 %, muß bei kleinen Volumenstromverhältnissen der Einfluß der Haftreibung auf die Stopfgrenze berücksichtigt werden.

8. Verwendete Symbole

D	Rohrdurchmesser	m
d_p	Partikeldurchmesser	m
F	von der Strähne erfüllter Rohrquerschnitt	m ²
F_0	Rohrquerschnittsfläche	m ²
f_r	Gleitreibungsbeiwert	-
g	Erdschwere	m/s ²
H	Gleithöhe	m
h	Strähnenhöhe	m
ΔJ	Impulsabgabe	kgm/s
K	Konstante	-
K_1	Konstante	-
K_2	Konstante	-
L	Rohrlänge für Gleitreibungsversuch	m
l	Bogenlänge	m
ΔL	Rohrlänge	m
m	Partikelmasse	kg
$\dot{M}$	Massenstrom	kg/s
$\dot{n}$	Partikelanzahlstrom	s ⁻¹ m ⁻²
ΔP	Druckverlust	kg/ms ²
ΔP_L	Luftdruckverlust	kg/ms ²
ΔP_z	Zusatzdruckverlust	kg/ms ²
R	Reibkraft	kgm/s ²
S	Schubkraft	kgm/s ²
s	Strähnenbreite	m
v	Luftgeschwindigkeit über der Strähne	m/s
v_0	Vergleichsgeschwindigkeit	m/s
v_x	Leerrohrluftgeschwindigkeit	m/s
V_s	Feststoffvolumen der Strähne	m ³
w	Strähnengeschwindigkeit	m/s
α	Winkel	Grad
β	Gleitreibungswinkel	-
ϵ	Porosität	-
λ	Strähnenantriebskoeffizient	-
λ_L	Druckverlustbeiwert der Luftströmung	-
ν	kinematische Fluidviskosität	m ² /s
ρ	Dichte	kg/m ³
ρ_0	Bezugsdichte	kg/m ³
τ	Schubspannung	kg/ms ²
ϕ	relativer freier Rohrquerschnitt	-

Dimensionslose Kennzahlen

$$\frac{\Delta P_z}{\rho_s \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_s}\right) (1-\epsilon) f_r g \Delta L}$$

Zusatzdruckverlustkennzahl
der Strähnenförderung

$$Fr = \frac{v_x}{\sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_f} \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_s}\right) (1-\epsilon) D g f_r}}$$

Froude-Zahl

$$Fr_D = \frac{v}{\sqrt{D g}}$$

Rohr-Froude-Zahl

$$\mu = \frac{\dot{M}_s}{\dot{M}_f}$$

Beladung

$$\frac{\rho_f}{\rho_s (1-\epsilon)} \mu$$

Volumenstromverhältnis

$$Re = \frac{v_x D}{\nu}$$

Rohr-Reynolds-Zahl

Indices

A	Betriebspunkt A
A1	Betriebspunkt A1
B	Betriebspunkt B
B1	Betriebspunkt B1
C	Betriebspunkt C
C1	Betriebspunkt C1
f	Fluid
G	über der Strähne
max.	maximal
s	Feststoff
St	in der Strähne

9. Literaturverzeichnis

- [1] Muschelknautz, E.; Auslegung pneumatischer Förderanlagen
Wojahn, H. Chemie-Ingenieur-Technik 46 (1974), 6,
S. 223 - 235

- [2] Weber, M. Strömungsfördertechnik
Krauskopf-Verlag GmbH, Mainz, (1974)

- [3] Barth, W. Strömungstechnische Probleme der Verfahrenstechnik
Chemie-Ingenieur-Technik 26 (1954), 1,
S. 29 - 34

- [4] Gasterstädt, J. Die experimentelle Untersuchung des pneumatischen
Fördervorganges
Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des Ingenieur-
wesens, VDI-Verlag GmbH, Berlin SW 19, (1924)

- [5] Segler, G. Untersuchungen an Körnbergebläsen und
Grundlagen für ihre Berechnung
Dissertation TH München (1934)

- [6] Siegel, W. Experimentelle Untersuchungen zur pneumatischen
Förderung körniger Stoffe in waagrechten Röhren
und Überprüfung der Ähnlichkeitsgesetze
VDI-Forschungsheft 538 (1970)

- [7] Rausch, W. Zur pneumatischen Dichtstromförderung
Fördern und Heben 23 (1973), 1, S. 7-11

- [8] Lippert, A. Die Staub-Luft-Förderung von Pulvern und
Schüttgütern mit hohen Gutkonzentrationen im
Gasstrom. - Ein neuer Fördervorgang.
Experimentelle und theoretische Untersuchung,
Dissertation TH Karlsruhe (1965)

- |9| Flatt, W.;
Allenspach, W. Erhöhen der Förderleistung und Verbessern des Wirkungsgrades pneumatischer Förderanlagen
Chemie-Ingenieur-Technik 41 (1969), 21,
S. 1173-1176

- |10| Muschelknautz, E.; Vereinfachte Berechnung horizontaler pneumatischer
Krambrock, W. Förderleitungen bei hoher Gutbeladung mit fein-
körnigen Produkten
Chemie-Ingenieur-Technik 41 (1969), 21,
S. 1164-1172

- |11| Welschhof, G. Pneumatische Förderung bei großen Fördergut-
konzentrationen
VDI-Forschungsheft 492 (1962)

- |12| Weber, M.; Das Zustandsdiagramm der pneumatischen Förderung
Scholl, K.H. vt "Verfahrenstechnik" 7 (1973), 5, S. 131-135

- |13| Zens, A. Minimum velocity for catalyst flow
Petroleum Refiner 36 (1957), 6, S. 133-142

- |14| Matsumoto, S.; Effect of particle size on the minimum transport
Kikuta, M.; velocity for horizontal pneumatic conveying
Maeda, S. of solids
Journal of Chemical Engineering of Japan 10 (1977),
4, S. 273-279

- |15| Ochi, M.; Minimum transport velocity of granular materials
Ikemori, K. at high concentration in a horizontal pipe
Bulletin of the JSME 21 (1978), June, S. 1008-1014

- |16| Molerus, O. Zur Beschreibung feststoffbeladener Strömungen
Chemie-Ingenieur-Technik 49 (1977), 12, S. 945-955

- [17] Bohnet, M. Experimentelle und theoretische Untersuchung über das Absetzen, das Aufwirbeln und den Transport feiner Staubteilchen in pneumatischen Förderleitungen VDI-Forschungsheft 507 (1965)
- [18] Scholl, K.H. Horizontale pneumatische Förderung mit kleinen Geschwindigkeiten und hoher Feststoffkonzentration Dissertation Universität Karlsruhe (TH) (1974)
- [19] Flatow, J. Untersuchungen über die pneumatische Flugförderung in lotrechten Rohrleitungen VDI-Forschungsheft 555 (1973)
- [20] Flatow, J. Untersuchungen zur Stopfgrenze bei der pneumatischen Flugförderung von körnigen Stoffen im waagerechten Rohr vt "Verfahrenstechnik" 7 (1973), 5, S. 131-141
- [21] Plass, L. Wärmeübergang und Druckverlust bei Feststoff-Flüssig Suspensionen feiner Teilchen im gesamten pumpfähigen Konzentrationsbereich Dissertation Universität Erlangen (1972)
- [22] Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau, 13. Aufl., Springer-Verlag, Berlin (1970)
- [23] Kohmann, H. Experimentelle Untersuchungen zum Fließverhalten verschiedener kohäsiver Schüttgüter, Vergleich der kritischen Austrittsquerschnitte nach der Jenike-Methode mit Zentrifugenversuchen Diplomarbeit am Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik der Universität Erlangen-Nürnberg 1976

Lebenslauf
=====

- 1951 Geboren am 10. August 1951 in Bad Königshofen im Grabfeld
als Sohn des Amtsinspektors Ernst Wirth und seiner Ehefrau
Hildegard Wirth, geb. Unger
- 1957 - 1964 Besuch der Volksschule in Bad Königshofen im Grabfeld
- 1964 - 1968 Besuch der Realschule in Bad Königshofen im Grabfeld
- 1968 Mittlere Reife am 23. Juli 1968
- 1968 - 1971 Besuch des Röntgen-Gymnasiums (mathematisch-naturwissen-
schaftlicher Zweig) in Würzburg
- 1971 Abitur am 19. Juni 1971
1. Juli 1971 bis 27. August 1971 Industriepraktikum bei
Siemens AG Bad Neustadt/Saale
- 1971 - 1977 Studium des Chemie-Ingenieur-Wesens unter besonderer Betonung
der Lebensmittelverfahrenstechnik an der Universität Karls-
ruhe (TH)
- 1976 14. April 1976 bis 26. Juni 1976 Industriepraktikum bei
Neles Oy Helsinki/Finnland
- 1977 Diplomhauptprüfung am 22. Juni 1977
- seit 1.10.1977 zunächst als Verwalter der Dienstgeschäfte eines wissenschaft-
lichen Assistenten, ab 16. 9. 1978 als wissenschaftlicher
Assistent am Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik der
Universität Erlangen-Nürnberg bei Professor Dr.-Ing. O. Molerus.

Copy-Center 2000

852 ERLANGEN · Obere Karlstr. 30
Tel. 09131-26197